

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI
Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal

Bruno Oliveira Lafetá

**AVALIAÇÕES SILVICULTURAIS EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTO EM
ALTO FUSTE E TALHADIA**

Diamantina
2019

Bruno Oliveira Lafetá

**AVALIAÇÕES SILVICULTURAIS EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTO EM
ALTO FUSTE E TALHADIA**

Tese apresentada à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, área de concentração em Silvicultura e Manejo Florestal, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Reynaldo Campos Santana
Coorientador: Prof. Dr. Márcio Leles Romarco de Oliveira

**Diamantina
2019**

Elaborado com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

L162a Lafetá, Bruno Oliveira
Avaliações silviculturais em povoamentos de eucalipto em alto fuste e talhadia / Bruno Oliveira Lafetá, 2019.
74 p. : il.

Orientador: Reynaldo Campos Santana
Coorientador: Márcio Leles Romarco de Oliveira

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2019.

1. Amostra composta de solo. 2. Pilhas de madeira. 3. Potencial produtivo. 4. Representatividade. 5. Talhadia. I. Santana, Reynaldo Campos. II. Oliveira, Márcio Leles Romarco de. III. Título IV. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri.

CDD 634.95

Ficha Catalográfica – Serviço de Bibliotecas/UFVJM
Bibliotecária Nádia Santos Barbosa – CRB6/3468

BRUNO OLIVEIRA LAFETÁ

**Avaliações silviculturais em povoamento de eucalipto em alto fuste
e talhadia**

Tese apresentada ao DOUTORADO
EM CIÊNCIA FLORESTAL, nível de
DOUTORADO como parte dos
requisitos para obtenção do título de
DOUTOR EM CIÊNCIA FLORESTAL

Orientador (a): Prof. Dr. Reynaldo
Campos Santana

Co-orientador: Prof. Dr. Marcio Leles
Romarco de Oliveira

Data da aprovação : 28/06/2019



Prof.Dr. REYNALDO CAMPOS SANTANA - UFVJM



Prof.Dr. MARCIO LELES ROMARCO DE OLIVEIRA - UFVJM



Prof.Dr. HELIO GARCIA LEITE - UFV



Prof.Dr. JULIO CESAR LIMA NEVES - UFV



Prof.Dr. HAROLDO NOGUEIRA DE PAIVA - UFV

DEDICO

*A minha avó, Maria das Mercês (in memorian),
meus amados pais,
minha querida irmã,
ao meu amor,
com todo carinho.*

*“Cada sonho que você deixa para traz,
é um pedaço de futuro que deixa de existir...”*

Steve Jobs

AGRADECIMENTOS

A Deus, Nossa Senhora Aparecida e Santa Terezinha pela oportunidade e inspirações para o desenvolvimento desta tese e conclusão do doutorado.

Aos meus pais, Luiz Fernando e Célia, irmã Mariana, e familiares pela confiança, amor, apoio e incentivo.

A minha princesa Tamires, pelo amor, companheirismo e apoio, principalmente, nos momentos difíceis.

Ao professor e amigo Reynaldo Campos Santana pela paciência, ensinamentos e confiança durante os mais de seis anos de orientação (iniciação científica na graduação, mestrado e, agora, doutorado). Muito obrigado!

Ao professor e, também, amigo Márcio Leles Romarco de Oliveira pela coorientação, paciência, ensinamentos e confiança.

Aos professores Evandro Luiz Mendonça Machado e Eric Bastos Gorgens pela amizade, paciência, conselhos e ensinamentos.

Ao Núcleo de Estudos em Silvicultura – NESil pela amizade e ensinamentos.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal pelos ensinamentos durante o curso.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *campus* São João Evangelista, em especial ao Colegiado de Ciências Agrárias e Ambientais, pela confiança e concessão de afastamento para a conclusão do doutorado.

A Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, em especial ao Departamento de Engenharia Florestal.

A empresa Aperam Bioenergia, em especial a Nivaldo de Souza Martins, que contribuiu para a concepção desta tese.

A Universidade Federal de Viçosa pelo espaço cedido para a defesa desta tese.

Aos colegas de graduação e pós-graduação pela amizade, respeito e todos os bons momentos vividos.

Aos meus amigos, por estarem sempre ao meu lado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Investigações científicas que contemplam a produtividade em múltiplas rotações e a amostragem de solos são relevantes para a silvicultura de precisão e adequação de operações florestais à determinados sistemas de cultivo. A tese se encontra dividida em três capítulos. A produção de eucalipto em diferentes rotações, sítios e arranjos espaciais foi tema do primeiro capítulo e notou-se que a diferença de produtividade entre rotações diminuiu em sítios menos produtivos. Além disso, os arranjos espaciais $3,0 \times 2,8$ e $6,0 \times 1,4$ m demonstram maior potencial volumétrico na primeira e segunda rotação, respectivamente. Posteriormente, foi desenvolvido o segundo capítulo na busca de precisão para a representatividade da fertilidade de solos florestais, importante etapa para a racionalização do uso de fertilizantes e estabelecimento de povoamentos. O erro amostral foi menor à medida que aumentou a quantidade de amostras compostas de solo. Para uma área de 9.101ha (265 talhões comerciais), a representatividade de todos os atributos químicos (erro amostral de 5%) foi alcançada lançando aleatoriamente uma amostra composta a cada 29ha (1:29). Em seguida, o terceiro capítulo investigou a influência da presença de pilhas de madeira na distribuição de diâmetros e área basal de eucaliptais. Executou-se o inventário florestal nas regiões de interior e margens dos talhões, onde se manteve pilhas de madeira após o baldeio. Constatou-se que, em idades avançadas, a área basal de brotações em tais margens de talhões não é menor em relação àquela do interior. Essas margens apresentam maior variabilidade de diâmetros em relação ao interior. Enfim, todos os resultados obtidos contribuem para o desenvolvimento do setor florestal e de futuras pesquisas sobre o estabelecimento e condução da eucaliptocultura.

Palavras-chave: Amostra composta de solo. Pilhas de madeira. Potencial produtivo. Representatividade. Talhadia.

ABSTRACT

Scientific research that contemplates productivity at multiple rotations and soil sampling is relevant to precision forestry and forest operations adequacy to particular cropping systems. The thesis is divided in three chapters. Eucalypt production at different rotations, sites and spatial arrangements was subject of the first chapter and it was noted that the difference in productivity between rotations decreased at less productive sites. In addition, spatial arrangements 3.0×2.8 and 6.0×1.4 m show higher volumetric potential in first and second rotations, respectively. Subsequently, second chapter was developed in the search for precision for representativeness of forest soils fertility, an important step for rationalization of fertilizers use and establishment of stands. Sampling error was smaller as the amount of soil samples increased. For an area of 9,101ha (265 commercial stands), representativeness of all chemical attributes (sample error of 5%) was achieved by randomly throwing a composite sample every 29ha (1:29). Then the third chapter investigated the influence of woodpiles presence in diametrical distribution and basal area of eucalypt. The forest inventory was realized in interior and margins regions of stands, where woodpiles were keep after the traffic. It was found that, at advanced ages, basal area of sprouts in such field margins is not smaller than that of the interior. These margins present greater diameter variability in relation to the interior. Finally, all the results obtained contribute to forestry sector development and future research on establishment and conduction of eucalypt plantations.

Keywords: Sample composed of soil. Woodpiles. Productive potential. Representativeness. Coppice.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	13
REFERÊNCIAS	15
 CAPÍTULO I – PRODUÇÃO DE EUCALIPTO EM DIFERENTES ROTAÇÕES, CLASSES DE SÍTIO E ARRANJOS ESPACIAIS	 17
1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
2. RESUMO	17
3. ABSTRACT	18
4. INTRODUÇÃO	18
5. MATERIAL E MÉTODOS	20
6. RESULTADOS	22
7. DISCUSSÃO	28
8. CONCLUSÕES	32
9. REFERÊNCIAS	32
10. CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
 CAPÍTULO II - PROCEDIMENTOS DE AMOSTRAGEM PARA FINS DE AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE DE SOLOS EM PLANTAÇÕES FLORESTAIS	 37
1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	37
2. RESUMO	37
3. ABSTRACT	38
4. INTRODUÇÃO	38
5. MATERIAL E MÉTODOS	41
6. RESULTADOS	44
7. DISCUSSÃO	48
8. CONCLUSÕES	52
9. REFERÊNCIAS	53
10. CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
 CAPÍTULO III - BROTAÇÕES DE EUCALIPTO EM ÁREA DE EMPILHAMENTO DE MADEIRA	 57
1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	57
2. RESUMO	57
3. ABSTRACT	58
4. INTRODUÇÃO	58
5. MATERIAL E MÉTODOS	60
6. RESULTADOS	62
7. DISCUSSÃO	66
8. CONCLUSÕES	69
9. REFERÊNCIAS	70
10. CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
 CONSIDERAÇÕES GERAIS	 74

INTRODUÇÃO GERAL

A tese contribui com o fluxo de informações sobre a definição de tratamentos silviculturais, que influenciam o crescimento e produção de eucalipto. Será útil para a atualização de técnicos e gestores interessados na área, assim como para a formação profissional de engenheiros florestais, agrônomos e tecnólogos em silvicultura. Definiram-se três capítulos, um sobre a produção volumétrica de rotações de eucalipto em diferentes classes de sítio e arranjos espaciais, outro acerca do dimensionamento do número mínimo de amostras compostas para a representatividade da fertilidade de solos e, por fim, um relacionado a distribuição de diâmetros e área basal às margens de talhões, onde se mantém madeira empilhada após o baldeio.

Os ganhos em produtividade do setor florestal são frequentemente atribuídos a avanços silviculturais em metodologias de propagação, preparo do solo, melhoramento genético, fertilização e controle de pragas. A produtividade de eucalipto aumentou principalmente a partir da década de 1970, plantações de eucalipto apresentavam incremento médio aos 7 anos em torno de $15 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e após 35 anos, esse valor se triplicou (STAPE *et al.*, 2010). Atualmente, pouco ou nenhum acréscimo produtivo médio tem sido relatado em condições operacionais para a eucaliptocultura. No que se refere a segunda rotação, o declínio produtivo tem sido expressivo e frequente em diversas regiões brasileiras. Ainda, persistem dúvidas sobre as causas desse declínio. A carência de conhecimento científico da segunda rotação está provavelmente relacionada à indisponibilidade de dados para a pesquisa, falta de dados confiáveis de talhadia e/ou amplo período necessário de avaliação.

A decisão em se conduzir uma ou mais rotações depende de aspectos econômicos e operacionais. A talhadia, representada pela condução de brotações, é uma alternativa à reforma de talhões e sua adoção se intensificou na eucaliptocultura a partir da crise de 2010 (GONÇALVES *et al.*, 2014; VISMARA; MEHTÄTALO; BATISTA, 2015). Entretanto, relatos sobre o declínio produtivo da talhadia ocorre tanto no Brasil quanto em outros países, como Espanha e Portugal (JONES *et al.*, 1999). Tratam-se de relatos antigos, como o realizado por Faria *et al.* (2002) ao pesquisarem povoamentos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden estabelecidos em dezembro 1981, sob Latossolo Vermelho Amarelo textura argilosa. Especulavam-se que a intensificação do cultivo resultaria em esgotamento nutricional e físico do solo, afetando a capacidade de retenção de água do solo (JONES *et al.*, 1999). Atualmente, têm sido levantadas diversas causas para explicar menores volumes madeireiros da talhadia,

como aspectos climáticos, genótipo, qualidade de operações mecanizadas e de práticas silviculturais.

O primeiro capítulo traz, como tema, a investigação do declínio de produtividade da segunda rotação em diferentes arranjos espaciais de plantio e classes de sítio. Os arranjos espaciais testados exibiam o mesmo espaçamento, de $8,4 \text{ m}^2 \text{ cova}^{-1}$, diferenciando-se em razão da retangularidade. O capítulo contou com um amplo conjunto de dados de inventário, 718 talhões comerciais (total de 20.317ha). Este fato foi desejável para melhor representação da realidade operacional dos povoamentos. Enfim, a resposta distinta da produção de eucalipto em diferentes arranjos espaciais, classes de sítio e rotações demonstrou que estratégias silviculturais específicas são essenciais para o estabelecimento e condução de longos ciclos de cultivo.

Na busca de altas produtividades, é necessário um eficiente planejamento no estabelecimento e manutenção de povoamentos. É preciso entender que povoamentos bem manejados requerem a disponibilização de recursos para o crescimento em quantidade e momento específicos. Apenas um nutriente deficitário é o suficiente para comprometer a produtividade. A avaliação da fertilidade permite balancear e racionalizar a aplicação de corretivos e fertilizantes. A primeira e principal etapa dessa avaliação é a amostragem, que consiste na coleta de amostras do solo. Tem-se disponíveis literaturas clássicas generalistas para a distribuição de pontos de coleta de solo, como a divisão em glebas nunca maiores que 10 (CANTARUTTI; ALVAREZ; RIBEIRO, 1999) ou 20ha (IAC, 2018), porém são raros os registros sobre a aplicação de procedimentos de amostragem específica para plantações florestais. Logo, o tema do segundo capítulo foi a representatividade das condições químicas do solo, importante para assegurar que as estimativas nutricionais sejam precisas e confiáveis.

O terceiro capítulo contemplou a investigação do declínio produtivo da talhadia devido a presença de pilhas de madeira às margens de talhões comerciais; as pilhas de madeira foram mantidas às margens logo após a operação de baldeio. Trata-se de uma curiosidade pertinente a gestão de profissionais do setor. As informações sobre esse tema são escassas ou, ainda, incipientes, haja vista que, a qualidade operacional da colheita é normalmente avaliada no interior de talhões e por curtos períodos de tempo, na maioria das ocasiões, inferiores a 12 meses. Portanto, nesse capítulo foi comparada a distribuição de diâmetros e área basal de duas regiões de talhão em diferentes classes de idade, o interior e a margem, onde se mantiveram pilhas de madeira após o baldeio.

Mediante o exposto, no começo e término da escrita técnica científica de cada capítulo foram inseridos dois tópicos, “Considerações iniciais” e “Considerações finais”. No

primeiro tópico foram descritas as motivações para o desenvolvimento do capítulo. Nas considerações finais, levantou-se as limitações e problemas técnicos encontrados no desenvolvimento dos capítulos, bem como, as soluções adotadas. Enfim, sendo concebida a presente tese, intitulada “Avaliações silviculturais em povoamentos de eucalipto em alto fuste e talhadia”.

REFERÊNCIAS

- CANTARUTTI, R. B.; ALVAREZ V. V. H.; RIBEIRO, A. C. Amostragem do solo. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H., eds. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (5ª Aproximação)**. Viçosa: Ed. UFV, 1999. p. 13-20.
- FARIA, G. E.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; TEIXEIRA, J. L. Produção e estado nutricional de povoamento de *Eucalyptus grandis*, em segunda rotação, em resposta à adubação potássica. **Revista Árvore**, v. 26, n. 5, p. 577-584, 2002.
- GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; BEHLING, M.; ALVES, J. M.; PIZZI, G. T.; ANGELI, A. Produtividade de plantações de eucalipto manejadas nos sistemas de alto fuste e talhadia, em função de fatores edafoclimáticos. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 411-419, 2014.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS (IAC). **Análise do solo, plantas, substratos resíduos e fertilizantes**. Disponível em: < <http://www.iac.sp.gov.br/> > Acesso em: 03 de jan. 2018.
- JONES, H. E.; MADEIRA, M.; HERRAEZ, L.; DIGHTON, J.; FABIÃO, A.; GONZÁLEZ-RIO, F.; MARCOS, M. F.; GOMEZ, C.; TOMÉ, M.; FEITH, H.; MAGALHÃES, M. C.; HOWSON, G. The effect of organic-matter management on the productivity of *Eucalyptus globulus* stands in Spain and Portugal: tree growth and harvest residue decomposition in relation to site and treatment. **Forest Ecology and Management**, v. 122, p. 73-86, 1999.
- STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M. A.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J. M.; SILVA, G. G. C.; AZEVEDO, M. R. The Brazil *Eucalyptus* potential productivity Project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 1684-1694, 2010.

VISMARA, E. S.; MEHTÄTALO, L.; BATISTA, J. L. F. Linear mixed-effects models and calibration applied to volume models in two rotations of *Eucalyptus grandis* plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 99, p. 1-24, 2015.

CAPÍTULO I

PRODUÇÃO DE EUCALIPTO EM DIFERENTES ROTAÇÕES, SÍTIOS E ARRANJOS ESPACIAIS

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este manuscrito foi desenvolvido com o propósito de investigar prováveis causas do declínio da produtividade em segundas rotações na região do Vale do Jequitinhonha em Minas Gerais.

Foram obtidas informações de um amplo banco de dados de inventário florestal, com medições realizadas em primeira e segunda rotação do mesmo ciclo de cultivo. A ideia surgiu a partir do cruzamento de informações silviculturais com a produção volumétrica em diferentes rotações. Inicialmente, o uso de médias generalistas prejudicava a interpretação de resultados e a busca por soluções que minimizassem o declínio de produtividade da segunda rotação. A definição de estratos baseados no arranjo espacial e classes de sítio foi útil para a identificação de circunstâncias em que não ocorriam declínio acentuado de produtividade.

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a produção volumétrica de rotações de eucalipto em diferentes índices de sítio e arranjos espaciais. Os dados foram provenientes de inventários florestais contínuos executados durante a primeira e segunda rotações de 718 talhões comerciais de eucalipto, implantados no espaçamento de $8,4\text{m}^2 \text{ cova}^{-1}$ e distribuídos em dois arranjos: $3,0 \times 2,8$ (retangularidade = 1,07) e $6,0 \times 1,4\text{m}$ (retangularidade = 4,29). O crescimento em altura, área basal e volume se diferenciou entre rotações à medida que melhorou a qualidade de sítio e aumentou a idade. Em termos absolutos, talhões com menor índice de sítio e instalados sob arranjo de maior retangularidade apresentaram menos divergência de volume entre rotações. Aos 84 meses de idade, a primeira rotação dos sítios de maior capacidade produtiva tendeu a exibir $42,63$ e $38,67\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ nos arranjos de menor e maior retangularidade, respectivamente. O declínio volumétrico relativo aos 84 meses na segunda rotação foi em média de 6,8 e 41,3% para os arranjos de $6,0 \times 1,4$ e $3,0 \times 2,8\text{m}$, respectivamente. Conclui-se que os

arranjos espaciais $3,0 \times 2,8$ e $6,0 \times 1,4$ m demonstram maior potencial volumétrico na primeira (alto fuste) e segunda rotação (talhadia), respectivamente.

Palavras-chave: Alto fuste. Potencial produtivo. Silvicultura. Talhadia.

EUCALYPT PRODUCTION IN DIFFERENT ROTATIONS, SITES AND SPATIAL ARRANGEMENTS

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the volumetric production of eucalypt rotations in different site indexes and spatial arrangements. The database came from continuous forest inventories executed during the first and second rotations of 718 commercial eucalyptus stands, implanted in the $8.4\text{m}^2 \text{ pit}^{-1}$ spacing and distributed in two arrangements: 3.0×2.8 (rectangularity = 1.07) and 6.0×1.4 m (rectangularity = 4.29). Growth in height, basal area and volume differed between rotations as site quality improved and age increased. In absolute terms, stands with lower site index and installed under a larger rectangular arrangement showed less volume divergence between rotations. At 84 months of age, first rotation of sites with highest productive capacity tended to show 42.63 and $38.67\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ in smaller and larger rectangularity arrangements, respectively. Volumetric decline at 84 months in second rotation was on average 6.8 and 41.3% for arrangements of 6.0×1.4 and 3.0×2.8 m, respectively. It is concluded that spatial arrangements 3.0×2.8 and 6.0×1.4 m show higher volumetric potential in first (high forest) and second (coppice) rotations, respectively.

Keywords: High forest. Productive potential. Forestry. Coppice.

INTRODUÇÃO

O potencial da produção silvicultural do Brasil é atribuído às suas condições edáficas e climáticas, tecnologias, melhorias operacionais e aplicação de resultados de programas de pesquisa em melhoramento genético e biotecnologia. O conhecimento detalhado do crescimento e produção madeireira de talhões é um requisito que o manejador deve se atentar em todo o ciclo florestal. A definição de práticas adequadas no estabelecimento de povoamentos

é crucial para que sejam alcançadas altas produtividades mesmo em rotações subsequentes (SILVA *et al.*, 2018).

A decisão em se conduzir alto fuste ou talhadia baseia-se em aspectos econômicos e operacionais (FERRAZ FILHO; SCOLFORO; MOLA-YUDEGO, 2014). Diversas empresas florestais brasileiras buscaram a redução de custos após a crise de 2010 e adotaram o sistema de talhadia como alternativa à reforma de talhões, sendo conduzidas duas ou mais rotações no mesmo ciclo de cultivo (GONÇALVES *et al.*, 2014; VISMARA; MEHTÄTALO; BATISTA, 2015). Em contraste à primeira rotação, o volume de rotações subsequentes pode ser variável (CORBEELS *et al.*, 2005; GONÇALVES *et al.*, 2014; MIRANDA; GOMINHO; PEREIRA, 2015; VISMARA; MEHTÄTALO; BATISTA, 2015; DUBE *et al.*, 2017). De acordo com GONÇALVES *et al.* (2014), a diferença de produtividade entre rotações de *E. grandis* W. Hill ex Maiden x *E. urophylla* S. T. Blake é distinta entre sítios. Apesar da quantidade de investimentos destinados à talhadia, persistem dúvidas sobre a influência da qualidade de sítio e aspectos silviculturais na produtividade da segunda rotação.

Os principais determinantes da produtividade são a capacidade produtiva local, genótipo e tratamentos silviculturais (FORRESTER *et al.*, 2012; BINKLEY *et al.*, 2017). Tratam-se de fatores que influenciam o crescimento e competitividade, porém frequentemente recebem atenção individual (RESENDE *et al.*, 2018). Pesquisas que contemplam a interação de classes de sítio e arranjos espaciais em diferentes rotações são escassas e, muitas vezes, incipientes. É provável que a falta de conhecimento científico da segunda rotação se relacione à indisponibilidade de dados para a pesquisa, amplo período necessário de avaliação e/ou falta de percepção técnica.

A seleção de sítios para o estabelecimento de povoamentos e a escolha do arranjo espacial são decisões que antecedem o plantio e devem ser vistas com cautela (WEST, 2006). A capacidade produtiva local pode ser entendida como o potencial de estoque madeireiro ou outro tipo de produto sob a condição ambiental existente e técnicas silviculturais empregadas. A altura dominante em determinada idade é a medida mais utilizada para caracterizar a capacidade produtiva, conhecido também como índice sítio, rotineiramente calculado para diferentes rotações.

O arranjo espacial refere-se à distribuição de plantas em um dado espaçamento, definido para atender adequadamente a mecanização desde a implantação até colheita florestal. Diversos arranjos podem ser definidos para um mesmo espaçamento, modalizando as distâncias entrelinhas e entreplantas (SHARMA; BURKHART; AMATEIS, 2002). A retangularidade do arranjo é definida como a razão entre a maior e menor dessas duas distâncias, resultando em

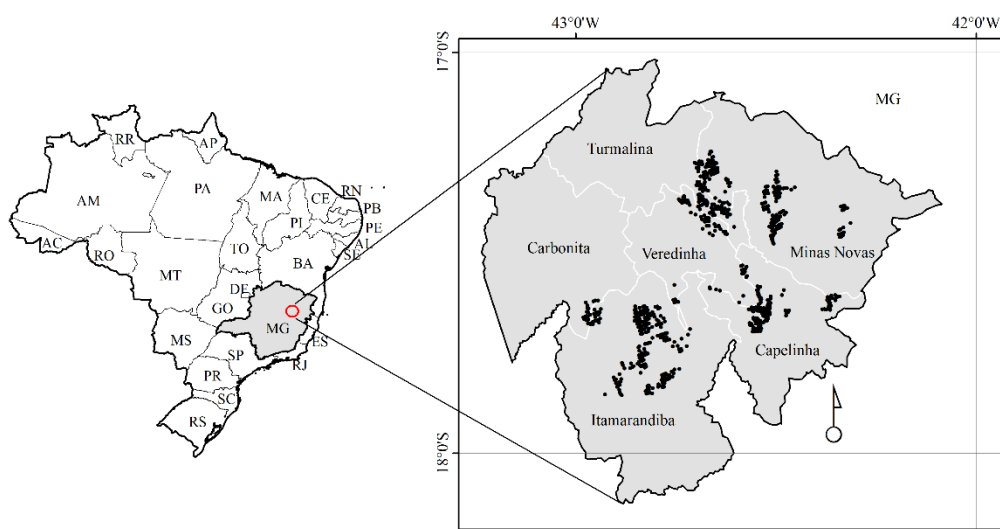
valores maiores ou iguais a 1. Arranjos espaciais de fileiras paralelas com padrão quadrado ou retangular são os mais adotados na eucaliptocultura.

Entender a interação entre a qualidade do sítio e arranjo espacial em diferentes rotações permite melhorias na alocação de recursos e produtividade. Mediante o exposto, as seguintes hipóteses foram testadas: i) a produção volumétrica é igual entre rotações para diversos índices de sítio? ii) arranjos espaciais com o mesmo espaçamento de plantio apresentam produções volumétricas diferentes entre rotações? O objetivo do presente trabalho foi avaliar a produção volumétrica de rotações de eucalipto em diferentes índices de sítio e arranjos espaciais.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido em 718 talhões comerciais de três clones de eucalipto, distribuídos entre as coordenadas de latitude 17° S e 18° S e de longitude 42° W e 43° W (Figura 1). A distribuição dos talhões contemplou os municípios de Carbonita, Capelinha, Itamarandiba, Minas Novas, Turmalina e Veredinha. O clima predominante nessa região do Vale do Jequitinhonha em Minas Gerais segundo sistema internacional de Köppen (KÖPPEN, 1936) é do tipo Cwa, temperado chuvoso (mesotérmico). Conforme normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), as médias anuais de temperatura, precipitação pluviométrica, umidade relativa do ar, insolação total e evaporação total (evaporímetro de Piché) são de 20,1 °C, 1.076,1 mm, 78,1%, 2.078 horas e 997,8 mm, respectivamente. A classe textural do solo variou de argilosa a muito argilosa pela classificação da Embrapa (2018).

Figura 1 – Localização dos talhões de eucalipto em diferentes municípios do Vale do Jequitinhonha em Minas Gerais, Brasil (Datum WGS84).



A área total avaliada foi de 20.317 ha, com talhões implantados no espaçamento de $8,4 \text{ m}^2 \text{ cova}^{-1}$, sob dois arranjos espaciais de plantio: $6,0 \times 1,4 \text{ m}$ (retangularidade = 4,29) e $3,0 \times 2,8 \text{ m}$ (retangularidade = 1,07). O ciclo de cultivo de cada talhão abrangeu duas rotações. Os procedimentos adotados para a condução da segunda rotação foram os mais adequados para sua época de execução, variando relativamente pouco ao longo dos anos (o baldeio do interior para a borda dos talhões era executado entre 60 a 65 dias após o corte e, posteriormente, realizado 45 dias após o corte). A condução da segunda rotação pautou-se predominantemente nas operações de baldeio das toras do interior para as margens dos talhões, empilhamento de toras, remoção da madeira à beira dos talhões, primeira desbrota e segunda desbrota (remoção de broto “ladrao”), realizadas em torno de 1,5 (45 dias), 3, 5, 6 e 12 meses. As brotações foram conduzidas deixando-se um broto por cepa e, em casos de falha, dois brotos por cepa. A seleção dos melhores brotos se baseou no vigor fisiológico, nas maiores dimensões de tamanho e qualidade de inserção na cepa.

Os dados para a análise do crescimento e produção foram provenientes de inventários florestais contínuos executados durante a primeira e segunda rotação do mesmo ciclo de cultivo. O período inventariado por rotação foi de 24 a 84 meses, entre outubro de 2001 a dezembro de 2017. Nem todos os talhões foram contemplados com medições até o final da segunda rotação. O processamento em nível de parcela foi realizado pela própria empresa florestal, sendo cedidas as estimativas médias de altura total (H , m), altura dominante (H_d , m), área basal (B , $\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$) e volume comercial com casca (V , $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$), todos os atributos em nível de talhão. O índice de sítio (S , m) foi definido para uma idade de 72 meses.

Os dados de cada arranjo espacial foram submetidos à análise de regressão não linear através do método iterativo de Levenberg-Marquardt. O modelo logístico de três parâmetros foi ajustado por rotação para a estimativa de cada atributo biométrico em função do índice de sítio e idade do talhão. Optou-se pelo modelo logístico em virtude da fundamentação biológica, facilidade de interpretação de seus parâmetros e crescente uso no setor florestal.

$$Y = \frac{\alpha S}{1 + \beta e^{-\gamma I}} + \varepsilon$$

Em que: Y = atributo biométrico (H, B e V); I = idade (meses); α , β e γ = parâmetros do modelo logístico; S = índice de sítio (m); e = constante neperiana; e ε = erro aleatório.

A qualidade dos ajustes foi avaliada de acordo com os valores da Média dos Desvios Absolutos (MDA), Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM) e coeficiente de correlação de Pearson (r). Menores valores de MDA e RQEM implicam em maior qualidade preditiva. A significância de parâmetros foi avaliada pelo teste t . A análise gráfica consistiu na inspeção estatística de superfícies de resposta, comparando o comportamento das rotações de cultivo. Para cada unidade de site (de 24 a 29m), calcularam-se os volumes correspondentes à tangente a parte inferior de curva (passando pela origem, P1), ponto de inflexão (P2), idade técnica de corte (ITC, P3) e a assíntota (P4). As duas primeiras métricas foram determinadas por derivação, ITC conforme máximo incremento médio mensal e a assíntota por relação multiplicativa entre valores do parâmetro “ α ” e índice de sítio. Os intervalos de idade correspondentes à origem até P1 e de P3 a P4 representam as fases de crescimento lento vegetal. O intervalo de intenso crescimento situa-se entre P1 e P3, atingindo o máximo incremento corrente em P2.

As análises estatísticas foram efetuadas com auxílio dos *softwares* ESRI ArcMap 10.3.1 e R versão 3.5.2 (R CORE TEAM, 2018), ao nível de significância de 1%.

RESULTADOS

As equações geradas para cada arranjo espacial e rotação são apresentadas na Tabela 1. Em geral, as equações de área basal e altura do arranjo $6,0 \times 1,4$ m exibiram menores valores de MDA e RQEM do que aquelas relacionadas ao $3,0 \times 2,8$ m. Os coeficientes de correlação foram elevados e significativos ($r \geq 0,83$, $p \leq 0,01$). A significância de parâmetros

($p \leq 0,01$) foi verificada em todos os ajustes do modelo logístico. Como esperado, o comportamento sigmoidal foi identificado em todas as superfícies de resposta obtidas.

Tabela 1 – Coeficientes e qualidade de ajuste do modelo logístico para a estimativa de área basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$), altura (m) e volume ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) da primeira e segunda rotações de eucalipto em função do índice de sítio (m) e idade (meses), para diferentes arranjos espaciais

Arranjo	Rotação	α	β	γ	MDA	RQEM	r
----- Área basal -----							
$6,0 \times 1,4 \text{ m}$	R1	0,843437	13,669114	0,061864	1,24	1,57	0,95**
	R2	0,796748	9,843509	0,053822	1,09	1,40	0,85**
$3,0 \times 2,8 \text{ m}$	R1	0,889845	11,398552	0,063670	1,32	1,71	0,94**
	R2	0,607558	10,601579	0,068476	1,38	1,79	0,85**
----- Altura -----							
$6,0 \times 1,4 \text{ m}$	R1	1,066172	6,340510	0,053809	0,88	1,17	0,97**
	R2	0,971453	4,199466	0,050691	1,08	1,40	0,87**
$3,0 \times 2,8 \text{ m}$	R1	1,043306	5,783277	0,055547	0,93	1,24	0,96**
	R2	0,849811	4,578410	0,057608	1,46	1,82	0,86**
----- Volume -----							
$6,0 \times 1,4 \text{ m}$	R1	10,297888	44,715312	0,072270	16,32	21,39	0,96**
	R2	9,335726	42,620920	0,075850	15,81	21,64	0,83**
$3,0 \times 2,8 \text{ m}$	R1	11,238978	35,399018	0,070839	17,48	22,39	0,96**
	R2	6,268169	35,206659	0,081484	16,78	23,13	0,85**

α , β e γ referem-se aos parâmetros do modelo logístico; MDA = média dos desvios absolutos; RQEM = raiz quadrada do erro médio; r = coeficiente de correlação; R1 = primeira rotação e; R2 = segunda rotação.

Os valores dos parâmetros “ α ” e “ β ” das equações da primeira rotação foram maiores em relação àqueles da rotação subsequente. O primeiro parâmetro divergiu mais entre rotações do arranjo de menor retangularidade, com amplitudes de variação aproximadamente 6, 2 e 5 vezes maiores em referência à área basal, altura e volume do $6,0 \times 1,4 \text{ m}$, respectivamente (Tabela 1). Em termos absolutos, o crescimento em altura, área basal e volume se diferenciou entre rotações à medida que aumentaram o índice de sítio e a idade (Figuras 2, 3 e 4). O coeficiente de correlação entre volume e área basal foi de 0,98 ($p \leq 0,01$) e entre volume e altura, de 0,96 ($p \leq 0,01$); mesmo valor para as rotações do mesmo ciclo de cultivo.

Figura 2 – Superfícies de resposta da área basal de eucalipto ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$, eixo z) em função do índice de sítio (m, eixo x) e idade (meses, eixo y); os pontos em vermelho representam os valores observados.

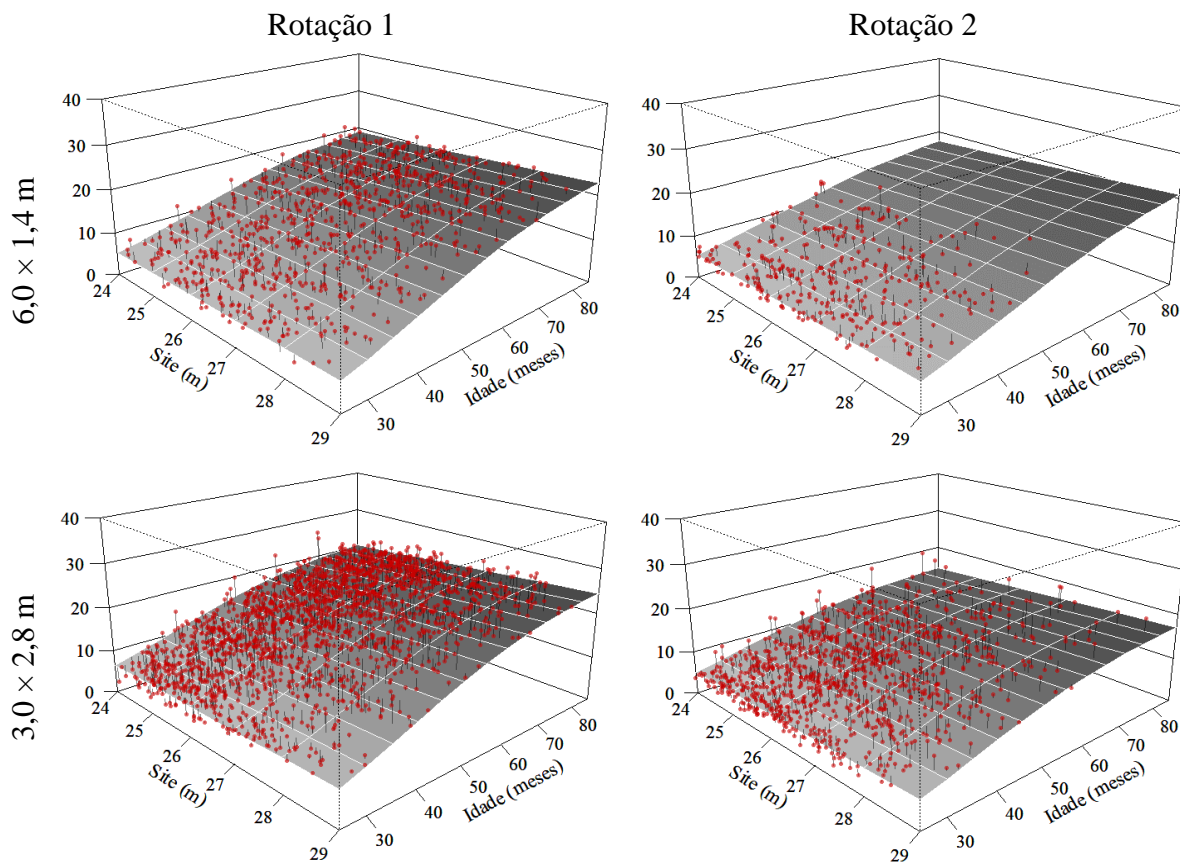


Figura 3 – Superfícies de resposta da altura de eucalipto (m^1 , eixo z) em função do índice de sítio (m, eixo x) e idade (meses, eixo y); os pontos em vermelho representam os valores observados.

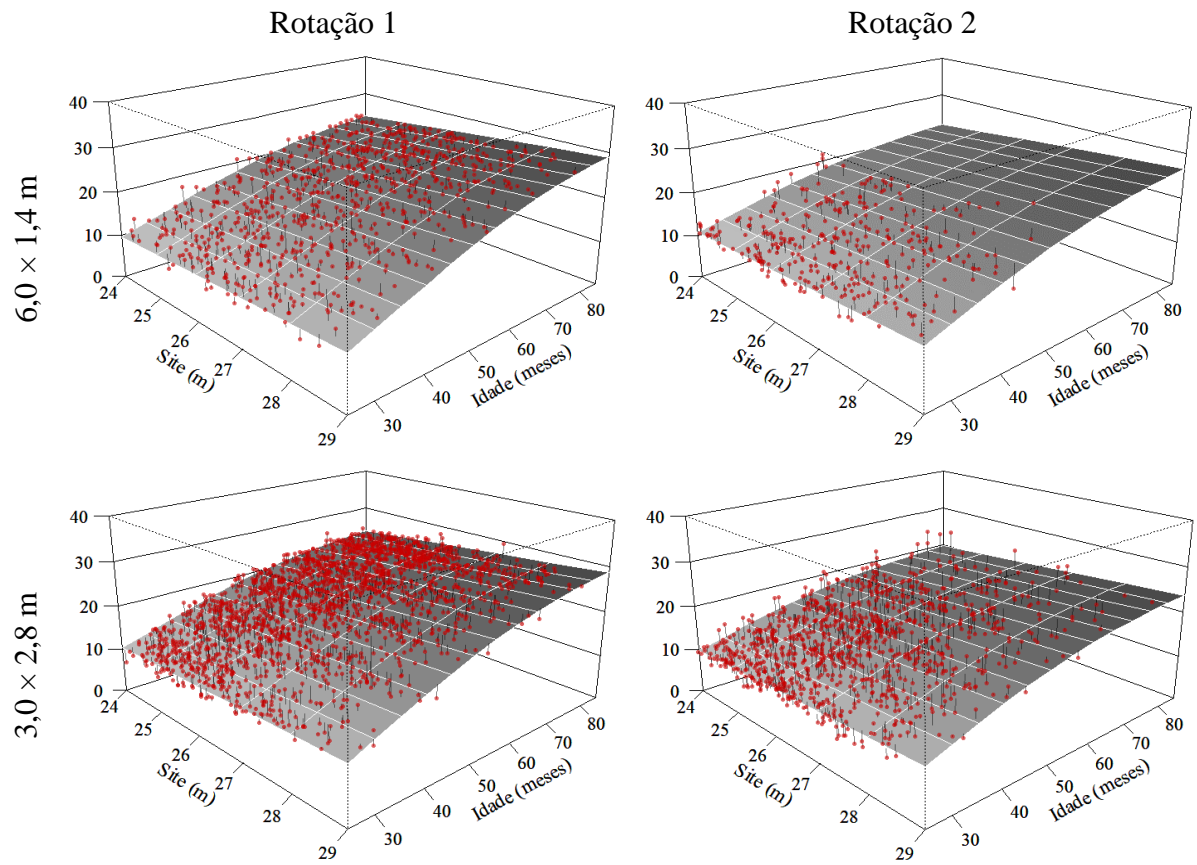
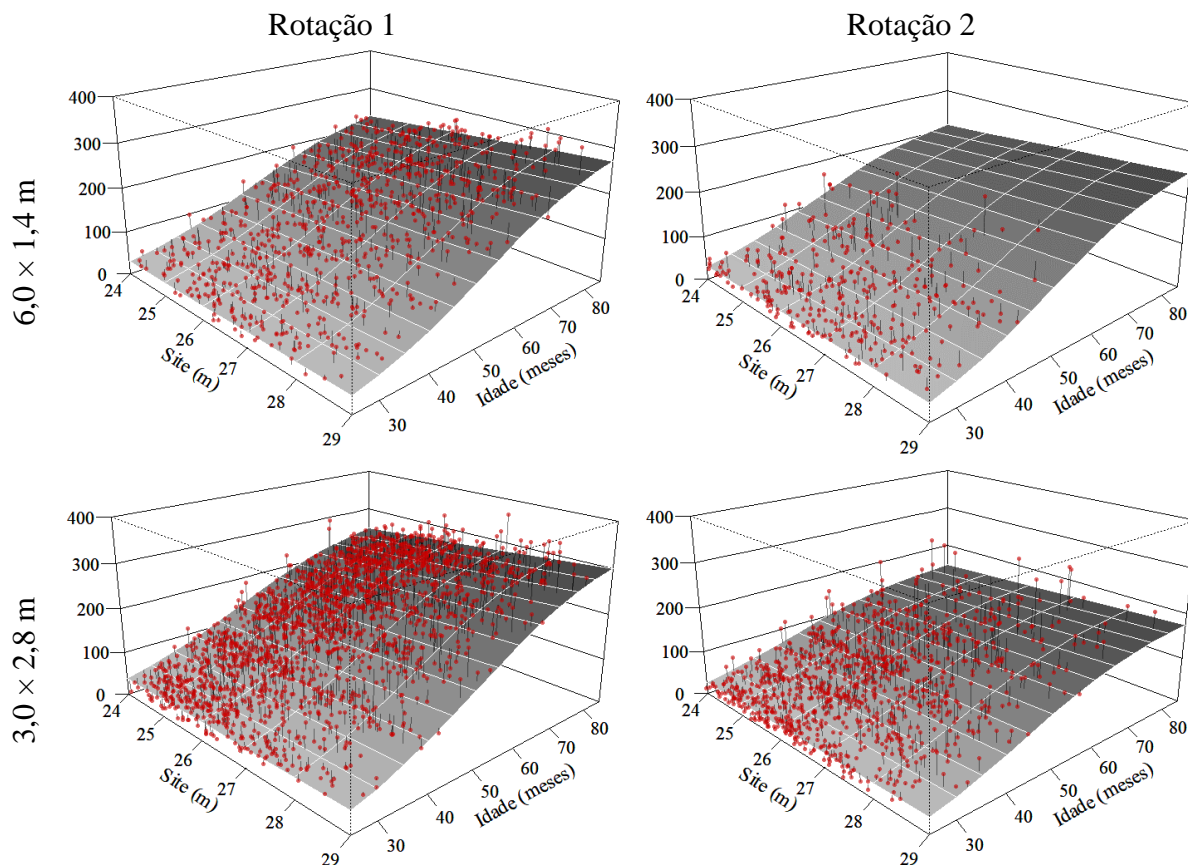


Figura 4 – Superfícies de resposta da produção volumétrica ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, eixo z) de eucalipto em função do índice de sítio (m, eixo x) e idade (meses, eixo y); os pontos em vermelho representam os valores observados.



O declínio volumétrico relativo aos 84 meses na segunda rotação foi em média de 6,8% e 41,3% para os arranjos de $6,0 \times 1,4 \text{ m}$ e $3,0 \times 2,8 \text{ m}$, respectivamente. A segunda rotação tendeu a exibir as menores idades para o ponto de inflexão e idades técnicas de corte para o espaçamento de $8,4 \text{ m}^2$. A diferença percentual da estimativa volumétrica da segunda rotação em relação à primeira foi positiva até os 57,1 meses no arranjo $6,0 \times 1,4 \text{ m}$, tendo a máxima diferença nesse intervalo aos 44,4 meses. A maior idade inventariada na segunda rotação deste arranjo foi de 62 meses. O declínio de volume na rotação subsequente foi mais pronunciado no arranjo $3,0 \times 2,8 \text{ m}$, aproximadamente, 6,7 vezes maior que o arranjo $6,0 \times 1,4 \text{ m}$.

A redução do declínio absoluto de volume na rotação subsequente se intensificou nos talhões com menores índices de sítio. O arranjo de menor retangularidade apresentou os maiores volumes nos pontos relacionados à tangente a parte inferior de curva, ponto de inflexão, idade técnica de corte e assíntota no tocante às equações volumétricas da primeira rotação e para os índices de sítio de 24 a 29 m (Tabela 2). Todas essas métricas reduziram na rotação

subsequente para ambos arranjos espaciais. A amplitude de variação da assíntota na segunda rotação foi maior no arranjo de maior retangularidade (amplitude de variação = 46,68 m³ ha⁻¹).

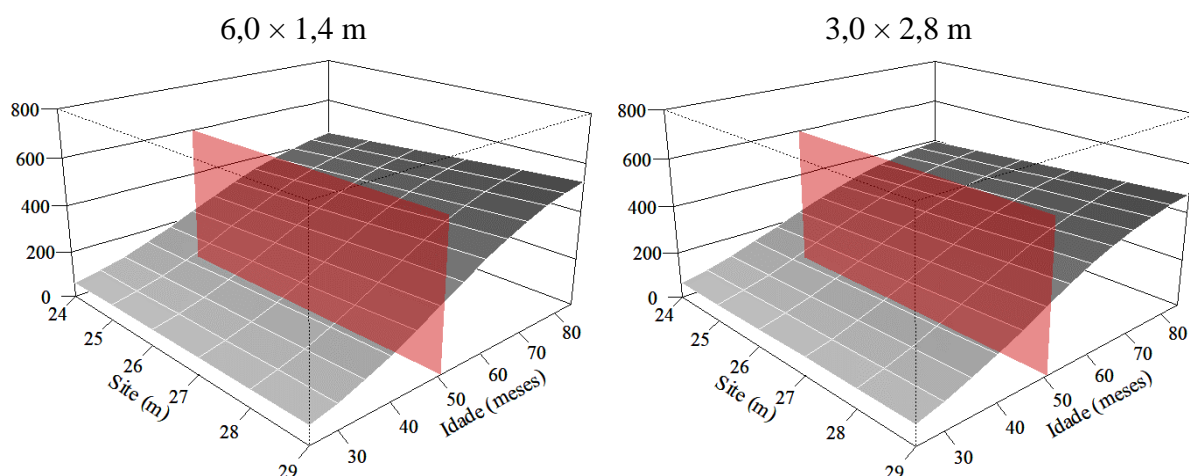
Tabela 2 – Diferença absoluta da estimativa volumétrica (m³ ha⁻¹) da segunda rotação (R2) em relação à primeira (R1), para diferentes índices de sítio (S, m) e arranjos espaciais de eucalipto

Rotações	Idade	S24	S25	S26	S27	S28	S29
----- 6,0 × 1,4m -----							
R2 - R1	24	0,56	0,58	0,60	0,63	0,65	0,67
	36	2,04	2,12	2,21	2,29	2,38	2,46
	48	2,50	2,61	2,71	2,82	2,92	3,02
	60	-1,38	-1,44	-1,50	-1,56	-1,61	-1,67
	72	-8,67	-9,03	-9,40	-9,76	-10,12	-10,48
	84	-15,17	-15,81	-16,44	-17,07	-17,70	-18,34
R1	P1	52,23	54,40	56,58	58,76	60,93	63,11
	P2	123,57	128,72	133,87	139,02	144,17	149,32
	P3	200,06	208,39	216,73	225,06	233,40	241,73
	P4	247,15	257,45	267,75	278,04	288,34	298,64
R2	P1	47,35	49,32	51,29	53,27	55,24	57,21
	P2	112,03	116,70	121,36	126,03	130,70	135,37
	P3	180,73	188,26	195,79	203,32	210,85	218,38
	P4	224,06	233,39	242,73	252,06	261,40	270,74
----- 3,0 × 2,8m -----							
R2 - R1	24	-10,98	-11,43	-11,89	-12,35	-12,81	-13,26
	36	-19,32	-20,13	-20,93	-21,74	-22,54	-23,35
	48	-35,42	-36,90	-38,38	-39,85	-41,33	-42,81
	60	-60,34	-62,85	-65,37	-67,88	-70,40	-72,91
	72	-85,07	-88,62	-92,16	-95,71	-99,25	-102,80
	84	-101,97	-106,22	-110,46	-114,71	-118,96	-123,21
R1	P1	57,00	59,38	61,75	64,13	66,50	68,88
	P2	134,87	140,49	146,11	151,73	157,35	162,97
	P3	215,12	224,08	233,04	242,01	250,97	259,93
	P4	269,74	280,97	292,21	303,45	314,69	325,93
R2	P1	31,79	33,12	34,44	35,76	37,09	38,41
	P2	75,22	78,35	81,49	84,62	87,75	90,89
	P3	119,92	124,92	129,91	134,91	139,91	144,90
	P4	150,44	156,70	162,97	169,24	175,51	181,78

P1 = tangente a parte inferior de curva (de 34,36 e 31,76 meses para R1 e de 32,11 e 27,54 meses para R2 nos arranjos de 6,0 × 1,4 e 3,0 × 2,8m, respectivamente); P2 = ponto de inflexão (de 52,59 e 50,35 meses para R1 e de 49,47 e 43,70 meses para R2 nos arranjos de 6,0 × 1,4 e 3,0 × 2,8m, respectivamente); P3 = idade técnica de corte (de 72,6 e 69,7 meses para R1 e de 68,3 e 60,5 meses para R2 nos arranjos de 6,0 × 1,4 e 3,0 × 2,8m, respectivamente) e P4 = assíntota.

Para melhor interpretação do comportamento do volume durante todo o ciclo de cultivo, foi elaborada a Figura 5, relacionando a produção com arranjo espacial e índices de sítio. O volume total estimado em duas rotações (produção da primeira rotação somada à da segunda) foi igual entre arranjos espaciais aos 50,8 meses. O arranjo $3,0 \times 2,8$ exibiu a maior estimativa de volume de ciclo até essa idade e, posteriormente, a relação se inverteu a favor do $6,0 \times 1,4$ m. As diferenças volumétricas entre arranjos espaciais aos 60, 72 e 84 meses foram de 14,83, 35,55 e 49,41 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, respectivamente.

Figura 5 – Superfícies de resposta do volume total produzido em duas rotações de eucalipto ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, eixo z), em diferentes sítios (m, eixo x), idades (meses, eixo y) e arranjos espaciais. O polígono em vermelho representa a idade da rotação cujo volume tende a se igualar entre arranjos espaciais (50,8 meses).



DISCUSSÃO

A modelagem do crescimento e da produção é uma ferramenta de gestão que respalda prescrições de manejo. Grandes conjuntos de dados de inventário são desejáveis para melhor representação da realidade operacional de povoamentos. A quantidade de informações biométricas em nível de talhão possibilitou o uso do modelo logístico com precisão, demonstrando flexibilidade e bom desempenho de ajuste. Em consequência da ampla plasticidade fenotípica que o eucalipto pode assumir em cenários com diferentes arranjos espaciais, idades e sítios (WEST, 2006; FORRESTER *et al.*, 2012; COBLE *et al.*, 2014; ALEGRIA *et al.*, 2019), a área basal, altura e volume foram estimados de maneira satisfatória pelas equações obtidas (Tabela 1). Enfatiza-se que o modelo de produção logístico utilizado é

de uso corrente no setor florestal brasileiro. Não sendo objetivo o estudo provar a eficiência do modelo si, mas a tendência da variável resposta em realidades operacionais.

Definiram-se relações funcionais de dupla entrada para a estimativa de área basal, altura e volume de eucalipto, utilizando o índice de sítio e a idade como variáveis preditoras (Figuras 2, 3 e 4). Esses três atributos biométricos tiveram melhor associação com a idade na primeira rotação; a maior amplitude da idade inventariada e menor dispersão de dados contribuíram para o maior valor dos coeficientes de correlação em relação aqueles da rotação subsequente. A área basal se correlacionou mais com a idade do que a altura em ambos os arranjos espaciais, aspecto estatístico relevante para cálculos volumétricos em povoamentos florestais.

Os dois arranjos espaciais, a uma constante densidade de 1.190 covas ha^{-1} , se divergiram menos em termos de altura na primeira rotação do que em área basal. A estimativa da média de altura aos 84 meses da primeira rotação variou pouco entre arranjos; a altura estimada nesta rotação foi de 23,94 (S = 24 m) a 28,92 m (S = 29 m) e de 23,75 (S = 24 m) a 28,69 m (S = 29 m) para os arranjos $6,0 \times 1,4$ e $3,0 \times 2,8$ m, respectivamente. A semelhança da altura de fustes entre arranjos também foi verificada por Bredenkamp (1982), para *Eucalyptus grandis* sob densidade de 1.736 covas ha^{-1} . Pesquisas mais recentes também corroboram com o resultado obtido, como encontrado por Prasad *et al.* (2010), que estudaram diferentes arranjos em espaçamentos de 6 m^2 .

A estimativa da média de altura aos 84 meses da segunda rotação oscilou entre arranjos espaciais; de 22,01 (S = 24 m) a 26,59 m (S = 29 m) e de 19,68 (S = 24 m) a 23,78 m (S = 29 m) para os arranjos $6,0 \times 1,4$ e $3,0 \times 2,8$ m, respectivamente. Uma hipótese pertinente a essa dispersão da estimativa de altura é a de que seja consequência de operações mecanizadas e/ou oscilações meteorológicas atípicas. Arranjos de menor retangularidade requerem mais atenção no manuseio de fustes durante a colheita florestal, a fim de se evitar danos ou a morte de cepas nos processos de derrubada e baldeio. Cepas danificadas tornam-se empecilhos para a emissão e desenvolvimento de brotos vigorosos, comprometendo a produção de rotações subsequentes (SCHWEGMAN *et al.*, 2017; SANTIAGO *et al.*, 2018).

O comportamento das superfícies de resposta geradas para a área basal aproximou-se daquele de volume (Figuras 2 e 4). O detalhamento das informações em diferentes arranjos espaciais e capacidades produtivas permitiu a análise de padrões de produção. A intensificação do crescimento (representado por P1) iniciou antecipadamente no arranjo $3,0 \times 2,8$ m, porém com menores volumes no que se refere aos pontos de inflexão e ITC somente na segunda rotação (Figura 4). Este resultado reflete a importância da adoção de procedimentos para melhor

qualidade de operações mecanizadas e de práticas silviculturais apropriadas para a condução de brotações, como adequado balanço nutricional nos primeiros anos de cultivo da rotação subsequente a fim de se manter ou aumentar a produtividade da talhadia.

Os talhões sob arranjo $3,0 \times 2,8$ m tenderam a exibir maior produtividade aos 84 meses (de 35,28 a 42,63 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ para os índices de sítio de 24 e 29 m, respectivamente) na primeira rotação do que aquele de maior retangularidade, $6,0 \times 1,4$ m (de 32,00 a 38,67 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ para os índices de sítio de 24 e 29 m, respectivamente). Este resultado está coerente com o preconizado na literatura florestal; para o mesmo espaçamento, arranjos espaciais de menor retangularidade são normalmente mais produtivos no manejo da primeira rotação (WEST, 2006; SANTOS *et al.*, 2019). O aumento da retangularidade estimula a mortalidade e restringe o uso da luz e produtividade devido a antecipação do contato de copas, sobretudo, em arranjos cuja retangularidade é superior a 2 (GONÇALVES *et al.*, 2014; WEST, 2006). Conforme Debell e Harrington (2002), a competição por radiação luminosa se intensifica ao longo da idade e a mortalidade se acelera mais nos arranjos retangulares do que naqueles quadrados.

A escolha do arranjo espacial deve ser vista com cautela, considerando também aspectos logísticos e econômicos. Arranjos retangulares proporcionam flexibilidade na disposição de plantações e facilita o acesso de máquinas entre linhas para o controle de matocompetição e outras operações relacionadas a manutenção e colheita do povoamento. Além disso, demandam menos trânsito de veículos, combustível, tempo e mão de obra, tornando a operação por unidade de área mais rápida e rentável financeiramente (CASSIDY; PALMER; SMITH, 2013; DANIEL *et al.*, 2018). Por outro lado, é conveniente salientar que o aumento da distância entre plantas estimula a proliferação de matocompetição, podendo, em alguns casos, inviabilizar a adoção de arranjos de maior retangularidade. O arranjo $3,0 \times 2,8$ m possui o dobro de fileiras de plantio em comparação ao $6,0 \times 1,4$ m, requerendo duas vezes mais trânsito de operações florestais executadas em linhas de plantio. Nas ocasiões cujas operações são feitas por linha de plantio, a economia pode atingir até 1.000 fileiras de cultivo por operação florestal para uma área de 3.000 ha (dimensões de 6 x 5 km).

A assíntota foi maior no arranjo de menor retangularidade na primeira rotação e essa relação se inverteu naquela subsequente. Mesmo com a retangularidade quatro vezes maior que o $3,0 \times 2,8$ m, o arranjo espacial $6,0 \times 1,4$ m exibiu menor declínio de estimativas volumétricas na segunda rotação em relação à primeira. Talhões com menor índice de sítio e instalados sob arranjo de maior retangularidade apresentaram menos divergência de volume entre rotações (Tabela 2). Esses fatos contribuíram para que a estimativa de produção total do

ciclo (volume de duas rotações) aos 84 meses do arranjo $6,0 \times 1,4$ m não fosse inferior à da $3,0 \times 2,8$ m (Figura 5). A menor diferença absoluta dos valores de assíntota entre rotações foi verificada para a combinação entre o índice de sítio de 24 m e arranjo $6,0 \times 1,4$ m (Tabela 1). O nível tecnológico adotado para a condução da segunda rotação no arranjo de maior retangularidade refletiu sua adequabilidade para sítios menos produtivos. Indica-se mais pesquisas para a definição de estratégias silviculturais específicas e apropriadas para sítios de maior potencial volumétrico, como melhorias para a definição de densidades de plantio, arranjos espaciais, condução de brotações, fertilização e controle de matocompetição.

Os melhores sítios na primeira rotação não necessariamente foram aqueles com maior índice de sítio na rotação subsequente. Tendo como referência o arranjo $3,0 \times 2,8$ m, que foi contemplado com medições até o final do ciclo de cultivo, as produtividades da segunda rotação foram de 20,71 a 25,03 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ para os índices de sítio de 24 e 29 m, respectivamente. A estimativa do declínio de produtividade na segunda rotação desse arranjo foi de 14,57 (S =24 m) a 17,60 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ (S =29 m). Ressalta-se que muitos fatores atuam na manutenção da produtividade e provocam variações no volume de madeira em talhões manejados sob talhadia, destacam-se o balanço nutricional, controle de plantas daninhas, doenças e pragas, regime hídrico, época e qualidade de colheita florestal, altura de corte e quantidade de brotações conduzidas (WEST, 2006). Nesta perspectiva, variações meteorológicas como a distribuição atípica de precipitação também afetam a produtividade de uma rotação; conforme o INMET, as menores precipitações pluviométricas durante a coleta de dados foram registradas em 2007 (581,7 mm), 2014 (590 mm) e 2017 (650,7 mm).

O arranjo espacial mais produtivo na primeira rotação não foi o mais adequado para conduzir a próxima rotação. Esta afirmação está condizente com o trabalho de Miranda, Gominho e Pereira (2015), que observaram maior declínio volumétrico na segunda rotação de *E. globulus* em arranjos de menor retangularidade. O arranjo de maior retangularidade favoreceu a produção da segunda rotação, sendo recomendado para os sítios em questão com vistas somente à produtividade volumétrica, o aumento do espaçamento entre linhas de 3 para 6 m e a redução do espaçamento entre plantas de 2,8 para 1,4 m. Tal diminuição da quantidade de fileiras, embora ainda mantendo a densidade de plantio, apresenta potencial para a minimização de custos da cadeia florestal e obtenção de elevadas produtividades no ciclo. Desde que previamente analisados todos os recursos disponíveis e custos envolvidos com a implantação e condução de povoamentos florestais, como o controle de matocompetição, sugere-se a utilização de espaçamentos retangulares com dimensões suficientes para operações silviculturais e de colheita florestal.

A possibilidade de declínio volumétrico em rotações subsequentes deve ser considerada no planejamento da regulação florestal. Nas ocasiões cuja a talhadia está prevista, mas não há dados sobre a segunda rotação, razões entre produções de primeira e segunda rotações são informações úteis que sustentam a tomada de decisões. Em termo médios, as razões das estimativas de volume para a segunda rotação em relação à primeira foram de 95,6 e 93,2% para o arranjo $6,0 \times 1,4$ m e de 61,7 e 58,7% para o $3,0 \times 2,8$ m nas idades de 72 e 84 meses, respectivamente (Tabela 2).

A escolha do arranjo espacial deve contemplar peculiaridades de materiais genéticos, ambiente, práticas silviculturais, objetivo do manejo, método de colheita e o tamanho do ciclo de cultivo (WEST, 2006). O arranjo espacial implantado reflete em decisões operacionais após o primeiro corte e condução de rotações sucessivas. Portanto, avaliações de longos ciclos de cultivo com diferentes rotações são fundamentais para melhor compreensão e definição de arranjos espaciais de plantio. A adoção de um arranjo que permite maiores produtividades em rotações sucessivas é importante para melhor planejamento do fluxo de caixa florestal e distribuição da produção madeireira.

Os resultados obtidos fornecem subsídios para o desenvolvimento de futuras pesquisas na busca de incremento produtivo de talhões manejados sob talhadia e levantamento de prováveis causas para declínios produtivos em rotações subsequentes em um mesmo ciclo de cultivo. Enfim, a resposta distinta da produção de eucalipto em diferentes arranjos espaciais, índices de sítio e rotações demonstrou que estratégias silviculturais específicas são essenciais para o estabelecimento e condução de longos ciclos de cultivo.

CONCLUSÕES

Os arranjos espaciais $3,0 \times 2,8$ e $6,0 \times 1,4$ m demonstram maior potencial volumétrico na primeira e segunda rotação, respectivamente.

A diferença da produção volumétrica entre rotações pode se acentuar em sítios mais produtivos. Estratégias silviculturais específicas para a condução da segunda rotação em sítios mais produtivos são essenciais para a maximização da produtividade.

REFERÊNCIAS

ALEGRIA, C.; PEDRO, N.; HORTA, M. C.; ROQUE, N.; FERNANDEZ, P. Ecological envelope maps and stand production of eucalyptus plantations and naturally regenerate

maritime pine stands in the central inland of Portugal. **Forest Ecology and Management**, v. 432, p. 327-344, 2019.

BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R. L.; CEGATTA, Í.; STAPE, J. L. The interactions of climate, spacings and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, p. 271-283, 2017.

BREDENKAMP, B. Rectangular Espacement does not cause stem ellipticity in *Eucalyptus grandis*. **South African Forestry Journal**, v. 120, n. 1, p. 7-10, 1982.

CASSIDY, M.; PALMER, G.; SMITH, R. G. B. The effect of wide initial spacing on wood properties in plantation grown *Eucalyptus pilularis*. **New Forests**, v. 44, p. 919-939, 2013.

COBLE, A. P.; AUTIO, A.; CAVALIERI, M. A.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Converging patterns of vertical variability in leaf morphology and nitrogen across seven *Eucalyptus* plantations in Brazil and Hawaii, USA. **Trees**, v. 28, p. 1-15, 2014.

CORBEELS, M.; MCMURTRIE, R. E.; PEPPER, D. A.; MENDHAM, D. S.; GROVE, T. S.; O'CONNEL, A. M. Long-term changes in productivity of eucalypt plantations under different harvest residue and nitrogen management practices: a modelling analysis. **Forest Ecology and Management**, v. 217, p. 1-18, 2005.

DANIEL, M. J.; GALLAGHER, T.; MITCHELL, D.; MCDONALD, T.; VIA, B. Changing times: altering establishment spacing, harvesting frequency, and harvesting machines to promote increased sawtimber volumes. **Frontiers in Energy Research**, v. 6, 2018, 13p.

DEBELL, D. S.; HARRINGTON, C. A. Density and rectangularity of planting influence 20-year growth and development of red alder. . **Canadian Journal of Forest Research**, v. 32, p. 1244-1253, 2002.

DUBE, T.; SIBANDA, M.; SHOKO, C.; MUTANGA, O. Stand-volume estimation from multi-source data for coppiced and high forest *Eucalyptus* spp. silvicultural systems in KwaZulu-Natal, South Africa. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 132, p. 162-169, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília: Embrapa, 2018. 589p.

FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S.; MOLA-YUDEGO, B. The coppice-with-standards silvicultural system as applied to *Eucalyptus* plantations – a review. **Journal of Forestry Research**, v. 25, n. 2, p. 237-248, 2014.

FORRESTER, D. I.; COLLOPY, J. J.; BEADLE, C. L.; WARREN, C. R.; BAKER, T. G. Effect of thinning, pruning and nitrogen fertilizer application on transpiration, photosynthesis and water-use-efficiency in a young *Eucalyptus nitens* plantation. **Forest Ecology and Management**, v. 266, p. 286-300, 2012.

GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; BEHLING, M.; ALVES, J. M.; PIZZI, G. T.; ANGELI, A. Produtividade de plantação de eucalipto manejadas nos sistemas de alto fuste e talhadia, em função de fatores edafoclimáticos. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 103, p. 411-419, 2014.

KÖPPEN, W. **Das geographische system der klimate**. Berlin: Gerbrüder Bornträger, 1936. 44 p.

MIRANDA, I.; GOMINHO, J.; PEREIRA, H. Heartwood, sapwood and bark variation in coppiced *Eucalyptus globulus* trees in 2nd rotation and comparison with the single-stem 1st rotation. **Silva Fennica**, v. 49, n. 1, p. 1-13, 2015.

PRASAD, J. V. N. S.; KORWAR, G. R.; RAO, K. V.; MANDAL, U. K.; RAO, C. A. R.; RAO, G. R.; RAMAKRISHNA, Y. S.; VENKATESWARLU, B.; RAO, S. N.; KULKARNI, H. D., RAO, M. R. Tree row spacing affected agronomic and economic performance of *Eucalyptus*-based agroforestry in Andhra Pradesh, Southern India. **Agroforest System**, v. 78, p. 253-267, 2010.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2018.

RESENDE, R. T.; SOARES, A. A. V.; FORRESTER, D. I.; MARCATTI, G. E.; SANTOS, A. R.; TAKAHASHI, E. K.; SILVA, F. F.; GRATTAPAGLIA, D.; RESENDE, M. D. V.; LEITE, H. G. Environmental uniformity, site quality and tree competition Interact to determine stand productivity of clonal *Eucalyptus*. **Forest Ecology and Management**, v. 410, p. 76-83, 2018.

SANTIAGO, R. A.; GALLAGHER, T.; SMIDT, M.; MITCHELL, D. Coppicing evaluation in the Southern USA to determine harvesting methods for bioenergy production. **International Journal of Forest Engineering**, v. 29, n. 2, p. 138-147, 2018.

SANTOS, P. H. R.; SANTANA, R. C.; OLIVEIRA, M. L. R.; GOMES, F. S. Benchmark: biomass production in *Eucalyptus plantations as a consequence of fertilization*. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 2, e20170606, 2019.

SCHWEGMAN, K.; LITTLE, K. M.; MCEWAN, A.; ACKERMAN, S. Harvesting and extraction impacts on *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* coppicing potential and rotations-end volume in Zululand, South Africa. **Southern Forests**, v. 80, n. 1, p. 51-57, 2018.

SHARMA, M.; BURKHART, H. E.; AMATEIS, R. L. Spacing rectangularity effect on the growth of loblolly pine plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 32, p. 1451-1459, 2002.

SILVA, G. C. C.; CALEGARIO, N.; SILVA, A. A. L.; CRUZ, J. P.; LEITE, H. G. L. Site index curves in thinned and non-thinned eucalyptus stands. **Forest Ecology and Management**, v. 408, p. 36-44, 2018.

VISMARA, E. S.; MEHTÄTALO, L.; BATISTA, J. L. F. Linear mixed-effects models and calibration applied to volume models in two rotations of *Eucalyptus grandis* plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 99, p. 1-24, 2015.

WEST, P. W. **Growing plantation forests**. Heidelberg: Springer-Verlag, 2006, 304 p.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste manuscrito, a disponibilidade de dados foi a maior limitação para que se intensificasse a estratificação a partir de outros critérios silviculturais, como material genético e regionais. A idade máxima inventariada na segunda rotação concernente ao arranjo $6,0 \times 1,4\text{m}$ foi de 62 meses. Entretanto, com o tratamento estatístico apropriado, a quantidade de dados disponibilizados foi suficiente para a representatividade das condições operacionais de uma grande empresa florestal. Ressalta-se que a precisão das estimativas além da idade máxima inventariada poderia ser ainda maior na segunda rotação, caso tivesse sido realizado o inventário e/ou disponibilizado dados em tal intervalo de idade.

Foram cedidas informações previamente processadas em nível de talhão. As informações processadas em nível de parcela ou árvore individual permitiria a modelagem mais detalhada do crescimento e produção florestal. Contudo, os dados atenderam a necessidade de forma precisa para que se identificassem circunstâncias em que o declínio acentuado de produtividade na segunda rotação não é realidade. Estratégias silviculturais, como a escolha do

arranjo espacial, são essenciais para o sucesso do estabelecimento povoamentos florestais e condução de sucessivas rotações.

CAPÍTULO II

PROCEDIMENTOS DE AMOSTRAGEM PARA FINS DE AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE DE SOLOS EM PLANTAÇÕES FLORESTAIS

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Após a análise da produção de eucalipto em diferentes rotações, sítios e arranjos espaciais (Capítulo 1), prosseguiu-se com a busca de precisão para a representatividade da fertilidade de solos florestais. A área de estudo apresentava homogeneidade das condições físicas e morfológicas do solo (FERREIRA, 2008).

A ideia surgiu das literaturas clássicas sobre a amostragem de solos (CANTARUTTI; ALVAREZ; RIBEIRO, 1999; IAC, 2018), que apresentam procedimentos generalistas para a representatividade da fertilidade de solos em diferentes culturas. No manuscrito, buscou-se avaliar a variabilidade de atributos químicos e dimensionar o número mínimo de amostras compostas para representar especificadamente a fertilidade de solos sob cultivo de espécie florestal.

RESUMO

Informações sobre a suficiência amostral que represente a distribuição de atributos químicos do solo são fundamentais para melhor racionalização do uso de corretivos e fertilizantes. O objetivo foi avaliar a variabilidade desses atributos e dimensionar o número mínimo de amostras compostas para representar a fertilidade de solos florestais. A área total de plantio foi de 9.101ha, constituída por 265 talhões comerciais de eucalipto. Foram obtidas 687 amostras compostas de solo para a análise química. Avaliou-se o desempenho de duas técnicas de análise exploratória e seis procedimentos de amostragem. Os atributos P, K, Ca, Mg e S apresentaram maior coeficiente de variação (>35%). Em contrapartida, as distribuições do Al, matéria orgânica e, principalmente, pH foram as mais homogêneas. O erro amostral foi menor à medida que aumentou a quantidade de amostras compostas. A representatividade de todos os atributos químicos (erro amostral de 5%) foi alcançada com o mínimo de 309 (uma a cada 29ha, 1:29) e 295 (1:31) amostras compostas para os procedimentos de amostragem casual simples e estratificada por classe de altitude, respectivamente. O primeiro procedimento se mostrou

eficiente para a amostragem de solo na área de plantio, especialmente, quando se aplicou o boxplot para identificação e remoção de *outliers*.

Palavras-chave: Boxplot. Estratificação. Tamanho da amostra.

SAMPLING OF CHEMICAL ATTRIBUTES IN FOREST SOILS

ABSTRACT

Information about sample adequacy that represents soil chemical attributes distribution are fundamental for a better rationalization of the use of correctives and fertilizers. The objective was to evaluate the variability of these attributes and to size the minimum number of composite samples to represent the fertility of forest soils. The total area planted was 9,101ha, constituted of 265 commercial eucalypt stands. The 687 soil composite samples obtained were for chemical analysis. It was evaluated the performance of two exploratory analysis techniques and six sampling procedures. The attributes P, K, Ca, Mg and S presented higher coefficient of variation ($>35\%$). In contrast, the distributions of Al, organic matter and, mainly, pH were the most homogeneous. The sample error was smaller as the amount of composite samples increased. The representative of all chemical attributes (sample error of 5%) was achieved with a minimum of 309 (one each 29ha, 1:29) and 295 (1:31) composite samples from sampling procedures simple casual and stratified by altitude class, respectively. The first procedure proved to be efficient for soil sampling in the planting area, especially, when applying the boxplot for identification and removal of outliers.

Keywords: Boxplot. Stratification. Sample size.

INTRODUÇÃO

As recomendações de corretivos e fertilizantes são baseadas em informações oriundas de procedimentos amostrais que, se realizados adequadamente, contribuem para o alcance da produtividade florestal pretendida. As amostras devem ser coletadas de maneira planejada e representar adequadamente a fertilidade do sítio que será adubado (HEIM *et al.*, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2014). A distribuição das unidades amostrais necessita ser realizada

em quantidade suficiente para que as estimativas das médias nutricionais sejam precisas e confiáveis (CANTARUTTI; ALVAREZ; RIBEIRO, 1999; BRUS, 2015).

O Brasil possui 7,84 milhões de hectares com povoamentos de eucalipto e pinus e, de forma geral, a amostragem de solo tem sido realizada por talhão, normalmente com área inferior a 50ha. Apesar da amostragem ser realizada por talhão, as recomendações de fertilização ocorrem de maneira genérica sem considerar critérios de estratificação, como tipo de solo, formação geológica, classe textural ou topografia. As razões para a generalização se pautam na facilidade operacional ou nas limitações tecnológicas que as empresas possuem para implementar uma silvicultura de precisão. Não é difícil encontrar empresas que adotem entre uma a três recomendações de fertilização por ano de cultivo. Frequentemente, nestas empresas se implantam mais de 1.000ha mensais. No outro extremo, produtores rurais que não possuem adequada infraestrutura tecnológica, raramente aplicam mais de uma recomendação de fertilização, independentemente do tamanho da área a ser implantada.

A análise química é rotineiramente feita com a amostra composta de solo, formada pela mistura homogênea de diversas amostras simples. Diante a predominância de pesquisas direcionadas à definição da quantidade de amostras simples para formar uma composta (SANTOS *et al.*, 2009; LIMA *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2013; GUARÇONI *et al.*, 2017), torna-se relevante o dimensionamento da quantidade de amostras compostas para a avaliação da fertilidade do solo. O tamanho da amostra por sua vez, é influenciado pela finalidade da amostragem, precisão requerida, método de seleção e distribuição das unidades amostrais, recursos disponíveis e, sobretudo, variação da característica de interesse (SHIVER; BORDERS, 1996). A dificuldade em representar a fertilidade decorre da desuniformidade espacial da composição química do solo, já que variações podem ocorrer naturalmente em razão de processos pedogenéticos e/ou de ações antrópicas como o uso e manejo do solo (GÓMEZ *et al.*, 2009; WASTOWSKI *et al.*, 2010; TIAN *et al.*, 2017; JIMÉNEZ-AGUIRRE *et al.*, 2018; LEOPIZZI *et al.*, 2018).

Há difusão de um pensamento de que a amostragem aleatória não é apropriada para a determinação da fertilidade, devido a dependência espacial de atributos químicos do solo (GUARÇONI *et al.*, 2017). Todavia, é conveniente ressaltar que a própria amostragem aleatória, fundamentada na estatística “clássica”, pode gerar independência entre unidades amostrais quando feita realmente ao acaso, o que justificaria seu uso (SHIVER; BORDERS, 1996; GUARÇONI *et al.*, 2017).

A forma mais simples para o cálculo de estimativas sobre a distribuição de atributos do solo é a utilização da amostragem casual simples. Trata-se de um procedimento

probabilístico em que cada unidade amostral da população possui a mesma chance de ser selecionada, independente das demais selecionadas (SHIVER; BORDERS, 1996). É um procedimento fundamental de seleção de unidades amostrais, a partir do qual derivaram todos os demais procedimentos de amostragem aleatório com o propósito de se obter maior economia e/ou, precisão. A distribuição aleatória ou em ziguezague dos pontos de coleta é extensivamente utilizada para a obtenção de amostras simples de solo. Nesta perspectiva, várias pesquisas têm contemplado a análise de representatividade de atributos químicos aplicando a amostragem casual simples ou análise geoestatística (HEIM *et al.*, 2009; LIMA *et al.*, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2015; GUARÇONI *et al.*, 2017). A amostragem casual pode, ainda, ser feita selecionando aleatoriamente unidades amostrais conforme prévia ou pós restrição imposta pela área de estratos. Tradicionalmente, a amostragem de solo é feita realizando uma divisão prévia da propriedade em glebas homogêneas para a distribuição de pontos de coleta (CANTARUTTI; ALVAREZ; RIBEIRO, 1999; IAC, 2018). Enfatiza-se que a definição de estratos é, em alguns casos, uma tarefa laboriosa comparada à distribuição de unidades amostrais de forma irrestrita, mas possui grande potencial para o controle do erro amostral (SHIVER; BORDERS, 1996).

A variabilidade espacial da fertilidade entre pontos distantes é, principalmente, consequência da ação de processos pedogenéticos (SANTOS *et al.*, 2009). Portanto, a estratificação de áreas extensas quanto à fatores que influenciam a pedogênese (clima, material de origem, relevo, tempo e organismos) pode ser uma alternativa para reduzir o erro amostral, aquele em que se incorre ao avaliar apenas parte da população (SHIVER; BORDERS, 1996; SIQUEIRA *et al.*, 2017). A obtenção de estratos que discriminam a distribuição dos atributos químicos reduz desperdícios de fertilizantes em solos sem deficiência de nutrientes e, quando deficientes, de subdosagens, possibilitando níveis ótimos para maiores produtividades (MACHADO *et al.*, 2007).

A negligência ao recolher menos unidades amostrais quando há exigência de maior tamanho de amostra provoca, em alguns casos, interpretações equivocadas que não representam as condições reais de fertilidade (LIEß, 2015). A falta de precisão pode resultar na aplicação desbalanceada de fertilizantes e comprometer o rendimento de povoamentos florestais ou de outras culturas. Espera-se que, a partir de dado instantâneo, o aumento da intensidade amostral não corresponda mais em acréscimo de precisão e que, além deste ponto, cada unidade medida se torne onerosa à amostragem realizada.

São raros os registros sobre a aplicação dos procedimentos de amostragem casual simples e estratificada para a definição da quantidade ótima de amostras compostas para fins

de avaliação da fertilidade de solos, específica para plantações florestais. Mediante o exposto, o objetivo foi avaliar a variabilidade de atributos químicos do solo e dimensionar o número mínimo de amostras compostas para representar a fertilidade de solos florestais empregando diferentes procedimentos de amostragem.

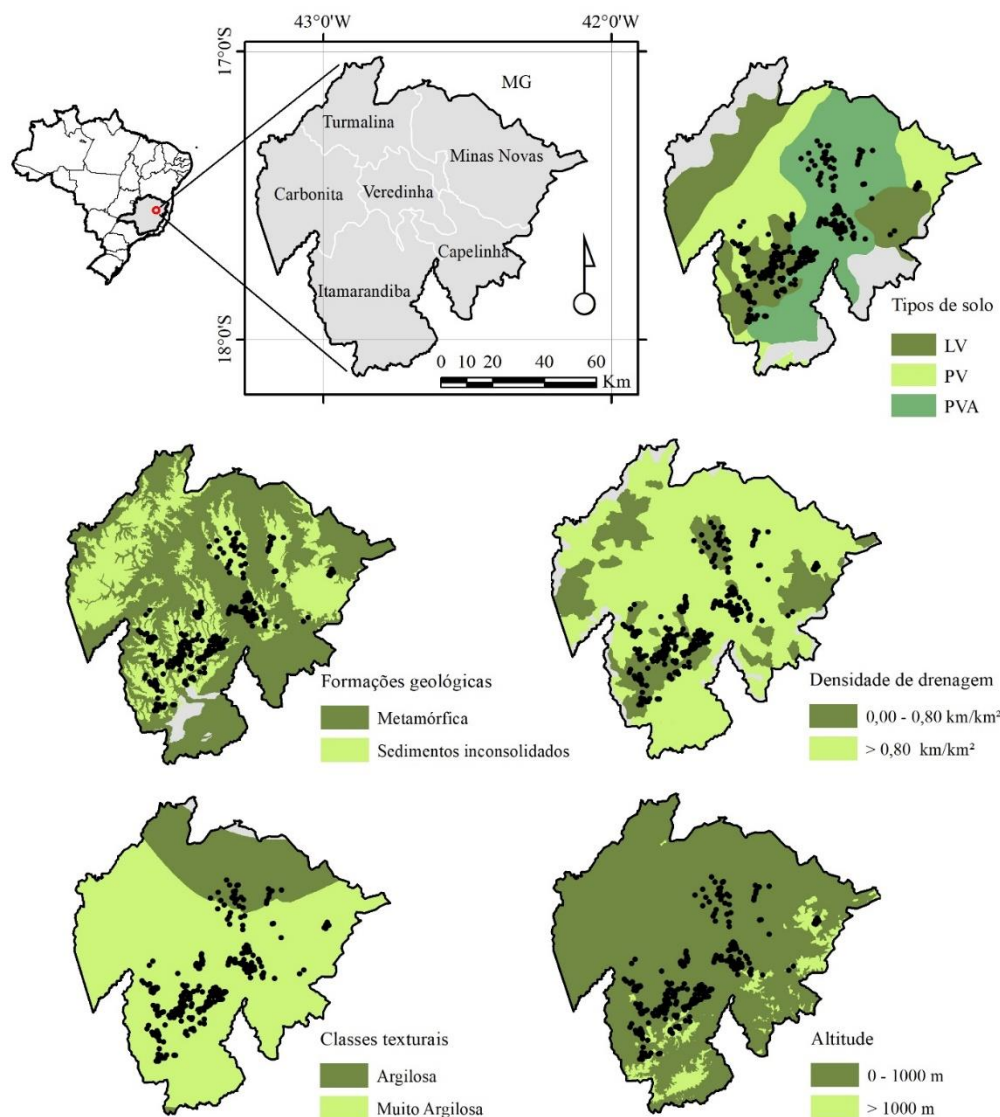
MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido em povoamentos de eucalipto localizados nos municípios de Carbonita, Capelinha, Itamarandiba, Minas Novas, Turmalina e Veredinha. O clima predominante nessa região do Vale do Jequitinhonha em Minas Gerais é o Cwa, temperado chuvoso (mesotérmico) com inverno seco e verão chuvoso, segundo sistema internacional de Köppen. De acordo Instituto Nacional de Meteorologia, as médias anuais de precipitação e temperatura se encontram nos intervalos de 850 a 1250mm e de 20 a 24°C, respectivamente.

A área total de plantio avaliada foi de 9.101ha, constituída por 265 talhões comerciais. Os talhões se encontravam distribuídos em diferentes tipos de solo, formações geológicas, densidades de drenagem (de 0,64 a 1,17km km⁻²), classes texturais e altitudes (de 819 a 1127m). Os talhões se concentraram no quadrante formado entre as coordenadas de latitude 17°S e 18°S e de longitude 42°W e 43°W.

Os solos foram classificados em: Latossolo Vermelho (LV, 3.491ha), Argissolo Vermelho (PV, 1.245ha) e Argissolo Vermelho Amarelo (PVA, 4.365ha); as formações geológicas em: metamórficas (699ha) e sedimentos inconsolidados (8.402ha); e as classes texturais em: argilosa (de 35 a 60% de argila, 1.084ha) e muito argilosa (mais de 60% argila, 8.017ha). Baseando-se na variabilidade dos atributos químicos, definiram-se preliminarmente dois grupos de maior homogeneidade para as densidades de drenagem (G1: 0 a 0,80km km⁻², com 3.738ha e, G2: > 0,80 km km⁻², com 5.363ha) e altitudes (G1: 0 a 1000 m, com 7.673ha e, G2: >1000 m, com 1.428ha). Os limites administrativos foram provenientes do banco de dados Global Administrative Areas, versão 2.8 (Figura 1).

Figura 1 – Localização dos talhões de eucalipto em diferentes estratos (Datum WGS84). Em que: LV – Latossolo Vermelho, PV – Argissolo Vermelho e PVA – Argissolo Vermelho Amarelo.



Cada unidade amostral (u.a.) foi caracterizada pela mistura homogênea de solo coletado em cinco pontos, distribuídos de maneira aleatória nas entrelinhas de plantio (um ponto por entrelinha). O número de u.a. iniciais, ou amostra piloto, foi definido em função da área de cada talhão. Foram obtidas duas amostras compostas nos talhões com área inferior a 30ha, três para aqueles com área entre 30 a 50ha e quatro quando apresentaram área maior do que 50ha, resultando em 687 u.a. na camada de 0 a 20cm de profundidade.

As amostras compostas de solo foram acondicionadas em embalagens plásticas devidamente identificadas e encaminhadas para a análise química. As determinações analíticas da composição química foram feitas segundo Raij *et al.* (2001): fósforo (P), potássio (K), cálcio

(Ca) e magnésio (Mg) utilizando o método da resina trocadora de íons; enxofre (S, SO_4^{-2}) por turbidimetria extraído com fosfato de cálcio, alumínio (Al) em KCl, matéria orgânica (MO) por colorimetria e potencial hidrogeniônico (pH) em H_2O .

Para cada atributo químico, avaliou-se o desempenho de duas técnicas de análise exploratória; a primeira sem remoção de *outliers* (P1), utilizando todas as observações, e a segunda com remoção de *outliers* aplicando a técnica de boxplot (P2). Esta técnica se baseia em análise gráfica para representar a variação de dados por meio de quartis. Todas as observações além dos limites críticos do boxplot foram identificadas como *outliers*. Os limites críticos foram definidos a partir da dispersão interquartil ($Q_3 - Q_1$), sendo o limite superior representado por “ $Q_3 + 1,5(Q_3 - Q_1)$ ” e o inferior por “ $Q_1 - 1,5.(Q_3 - Q_1)$ ”, em que Q_1 e Q_3 são primeiro e o terceiro quartil, respectivamente.

Para cada técnica de análise exploratória, os seguintes procedimentos de amostragem foram avaliados: Amostragem Casual Simples (ACS), Amostragem Casual Estratificada com pós-estratificações de acordo com tipo de solo (ACE1), formação geológica (ACE2), densidade de drenagem (ACE3), classe textural (ACE4) e altitude (ACE5). O tamanho da amostra relacionado à amostragem casual estratificada foi calculado pelo método da fixação ótima. Totalizaram-se 12 combinações entre as duas técnicas de análise exploratória e os seis procedimentos de amostragem. Realizou-se estatística descritiva para cada combinação, empregando o coeficiente de variação (CV), média (\bar{x}) e erro amostral (E, %).

O tamanho da amostra que representa o valor médio de cada atributo químico foi calculado a fim atender ao erro pré-estabelecido de 5%. Assumindo a população como infinita, o cálculo do tamanho da amostra para os procedimentos de amostragem foi realizado conforme Shiver e Borders (1996).

A técnica de análise exploratória e o procedimento de amostragem que resultaram em menor tamanho da amostra para atender à precisão pré-estabelecida foram selecionados para as análises subsequentes (cálculo do tamanho máximo da gleba para obtenção de uma u.a.). Também, optou-se pela seleção da amostragem casual simples em virtude de sua característica aleatória irrestrita e ampla utilização.

O tamanho máximo da gleba para obtenção de uma u.a. foi obtida pela razão entre a área total de plantio (dividendo) e a quantidade mínima representativa de amostras compostas (divisor). Simulou-se a quantidade recomendada de nutrientes para diferentes limites de confiança (5, 10, 20, 30 e 40%), calculados a partir da média dos teores de K e Ca nos solos sob cultivo de eucalipto. Nesta simulação, empregou-se as equações apresentadas por Santana,

Fontan e Oliveira (2014), desenvolvidas a partir do modelo simplificado de balanço nutricional NUTRICALC (NOVAIS *et al.*, 2007).

As análises estatísticas foram efetuadas com auxílio dos *softwares* ESRI ArcMap 10.3.1, Curve Expert 1.4 e R versão 3.3 (R CORE TEAM, 2017).

RESULTADOS

O coeficiente de variação dos atributos químicos avaliados em todo banco de dados decresceu na seguinte ordem: P (66,60%) > Mg (64,63%) > Ca (54,45%) > S (48,79%) > K (43,81%) > Al (25,22%) > MO (17,26%) > pH (4,77%). O erro amostral do banco de dados foi inferior a 5% em todos os procedimentos e atributos avaliados (Tabela 1). O maior erro foi observado para o P, variando de 4,55 a 4,99%.

Na presença de *outliers*, os critérios de estratificação reduziram o erro amostral em média de 0,02 (pH) a 0,44 (P) ponto percentual em relação à amostragem casual simples. A estratificação de acordo o tipo de solo diminuiu o erro relacionado ao P, K, MO e pH. A definição de classes de altitude aumentou a precisão das estimativas de Ca e Mg. As estratificações feitas segundo as formações geológicas e classes texturais implicaram em redução de erro amostral do S e Al, respectivamente.

Tabela 1 – Resumos das estatísticas dos procedimentos de amostragem para representar a distribuição de atributos químicos no solo.

Procedimento	\bar{x}	E (%)	\bar{x}^{BP}	E (%) ^{BP}	\bar{x}	E (%)	\bar{x}^{BP}	E (%) ^{BP}
----- P (mg dm ⁻³) -----				----- K (cmol _c dm ⁻³) -----				
ACS	5,713	4,99	4,807	3,37	0,041	3,28	0,040	2,80
ACE1	5,603	4,55	4,768	3,15	0,041	3,17	0,040	2,75
ACE2	5,745	4,89	4,852	3,26	0,041	3,29	0,040	2,82
ACE3	5,655	4,97	4,767	3,31	0,041	3,26	0,040	2,81
ACE4	5,799	4,86	4,856	3,29	0,041	3,29	0,040	2,81
ACE5	5,723	4,81	4,829	3,28	0,041	3,28	0,040	2,80
----- Ca (cmol _c dm ⁻³) -----				----- Mg (cmol _c dm ⁻³) -----				
ACS	0,520	4,08	0,471	3,20	0,198	4,84	0,163	3,55
ACE1	0,515	4,07	0,467	3,18	0,198	4,85	0,163	3,55
ACE2	0,525	3,98	0,475	3,09	0,199	4,79	0,164	3,51
ACE3	0,518	4,00	0,470	3,18	0,197	4,78	0,163	3,53
ACE4	0,522	4,00	0,473	3,12	0,197	4,79	0,163	3,55
ACE5	0,521	3,95	0,472	2,99	0,198	4,63	0,163	3,46
----- S (mg dm ⁻³) -----				----- MO (g dm ⁻³) -----				
ACS	10,227	3,65	9,656	3,29	43,262	1,29	43,224	1,28
ACE1	10,160	3,64	9,621	3,30	43,369	1,25	43,333	1,25
ACE2	10,298	3,61	9,714	3,26	43,261	1,29	43,222	1,28
ACE3	10,189	3,65	9,619	3,26	43,254	1,28	43,219	1,27
ACE4	10,294	3,62	9,716	3,26	43,084	1,26	43,048	1,25
ACE5	10,228	3,64	9,657	3,28	43,245	1,27	43,212	1,27
----- Al (cmol _c dm ⁻³) -----				----- pH -----				
ACS	0,658	1,89	0,658	1,89	4,759	0,36	4,756	0,34
ACE1	0,657	1,87	0,657	1,87	4,755	0,34	4,752	0,33
ACE2	0,655	1,88	0,655	1,88	4,767	0,34	4,763	0,32
ACE3	0,658	1,88	0,658	1,88	4,757	0,35	4,754	0,34
ACE4	0,660	1,86	0,660	1,86	4,755	0,35	4,752	0,33
ACE5	0,658	1,88	0,658	1,88	4,760	0,35	4,756	0,34

\bar{x} = média; E = erro amostral; ^{BP}Identificação e remoção de *outlier* aplicando boxplot; ACS = amostragem casual simples; ACE1, ACE2, ACE3, ACE4 e ACE5 = amostragem casual estratificada com estratificações de acordo tipo de solo, formação geológica, densidade de drenagem, classe textural e altitude, respectivamente; Coeficiente de variação antes da remoção de *outliers*: P = 66,60%, K = 43,81%, Ca = 54,45%, Mg = 64,63%, S = 48,79%, Al = 25,22%, MO = 17,26%, e pH = 4,77%; A quantidade de observações restantes após identificação e remoção de *outliers* aplicando boxplot para P (CV = 43,02%), K (CV = 37,02%), Ca (CV = 41,51%), Mg (CV = 44,70%), S (CV = 43,01%), Al (CV = 25,22%), MO (CV = 17,14%) e pH (CV = 4,54%) foi de 627, 673, 648, 613, 659, 686, 687 e 680 u.a., respectivamente.

Após a identificação e remoção de *outliers* aplicando o boxplot, a ordem de variabilidade (CV) foi assim modificada: Mg (44,70%) > P (43,02%) > S (43,01%) > Ca (41,51%) > K (37,02%) > Al (25,22%) > MO (17,14%) > pH (4,54%). Neste contexto, o Mg

apresentou maior erro de amostragem, de 3,46 a 3,55%. Verificou-se o predomínio de *outliers* acima do intervalo interquartilico.

Na aplicação da técnica de boxplot, não houve amostra composta cuja totalidade de atributos químicos tenha sido identificada como *outlier*. O máximo de *outliers* identificados para a mesma amostra composta foi de 4 (pH, P, Ca e S), condição encontrada em apenas uma 1 u.a. Na sequência, 12 u.a. apresentaram 3 *outliers* (múltiplos atributos) e 35 u.a. tiveram 2 *outliers* (múltiplos atributos). O Al não apresentou *outliers*.

O efeito de cada *outlier* removido foi mais pronunciado no P; atribuindo o erro máximo admitido de 5%, cada eliminação reduziu em torno de 6 a 7 amostras compostas para representá-lo. A combinação dos procedimentos que contemplaram a remoção de *outliers* e a amostragem casual estratificada por classes de altitude apresentou melhor desempenho (Tabela 2).

Tabela 2 – Quantidade mínima representativa de amostras compostas para atender ao erro máximo de 5%.

Atributo	ACS	ACE1	ACE2	ACE3	ACE4	ACE5
P	685	569	658	679	650	636
P ¹	286	250	267	276	273	270
K	296	277	298	292	297	296
K ¹	212	205	215	213	214	212
Ca	458	456	435	441	439	430
Ca ¹	266	263	248	262	253	232
Mg	645	647	632	629	632	589
Mg ¹	309	309	302	307	310	295
S	368	364	359	366	360	364
S ¹	286	288	280	281	281	284
MO	46	44	46	45	44	45
MO ¹	46	43	46	45	43	44
Al	99	96	98	98	95	97
Al ¹	99	96	98	98	95	97
pH	4	4	4	4	4	4
pH ¹	4	3	3	4	3	4

¹Identificação e remoção de *outlier* aplicando boxplot; ACS = amostragem casual simples; ACE1, ACE2, ACE3, ACE4 e ACE5 = amostragem casual estratificada com estratificações de acordo tipo de solo, formação geológica, densidade de drenagem, classe textural e altitude, respectivamente.

Para a amostragem casual estratificada por classe de altitude, a remoção de *outliers* diminuiu a quantidade mínima representativa de amostras compostas a serem coletadas de 636 (uma a cada 14ha, 1:14) para 295 u.a. (1:31) (Tabela 2). A diferença desse procedimento de

amostragem em relação à casual simples foi de 49 e 14 u.a. na presença e ausência de *outliers*, respectivamente. Ambos os procedimentos, sem *outliers*, foram selecionados para as análises subsequentes. O tamanho máximo da gleba para obtenção de 1 u.a. assumindo diferentes erros amostrais se encontra na Tabela 3. Menos amostras compostas implicaram em maiores erros amostrais.

Tabela 3 – Resumo da relação entre o tamanho máximo da gleba (ha) para obtenção de uma amostra composta e o erro amostral.

Cenário	Erro amostral (%)									
	5	10	20	30	40	5	10	20	30	40
	----- ACS -----					----- ACE5 -----				
C1	29	117	455	1011	1820	31	123	479	1011	1820
C2	32	126	506	1138	1820	32	128	506	1138	1820
C3	32	126	506	1138	1820	34	134	535	1138	1820

C1 = cenário em que se considera todos os atributos químicos; C2 = cenário em que apenas Ca e Mg não são objetos diretos da recomendação; C3 = cenário em que apenas Ca, Mg e S não são objetos diretos da recomendação; ACS = Amostragens casual simples; e ACE5 = Amostragem casual estratificada, com dois estratos de altitude.

Tendo em vista a pequena diferença da amostragem casual simples em relação à estratificada por classe de altitude, no que se refere à quantidade mínima de amostras compostas para a representatividade de solos, prosseguiu-se com a simulação da recomendação de nutrientes (Tabela 4). A quantidade recomendada de K_2O e CaO tendeu ao aumento nos sítios com baixos teores nutricionais. A amplitude de variação da quantidade recomendada de K_2O foi constante para as diferentes produtividades (30 a $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$); de 44 g planta^{-1} para o intervalo de $\pm 40\%$, de 33 g planta^{-1} para $\pm 30\%$, de 22 g planta^{-1} para $\pm 20\%$, de 11 g planta^{-1} para $\pm 10\%$ e de 6 g planta^{-1} para $\pm 5\%$.

Tabela 4 – Recomendação de nutrientes para diferentes limites de confiança, calculados a partir da média dos teores de K e Ca nos solos sob cultivo de eucalipto.

Produtividade (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Limites de confiança em torno da média (%)										
	-40	-30	-20	-10	-5	0 (\bar{x})	5	10	20	30	40
K ₂ O (g planta ⁻¹)											
30	99	93	88	82	80	77	74	71	66	60	55
35	122	116	111	105	102	99	97	94	88	83	77
40	144	139	133	128	125	122	119	116	111	105	100
45	167	161	156	150	147	145	142	139	134	128	122
50	190	184	178	173	170	167	164	162	156	151	145
CaO (kg ha ⁻¹)											
30	99	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	167	117	68	19	0	0	0	0	0	0	0
40	234	185	136	86	62	37	12	0	0	0	0
45	302	253	203	154	129	105	80	55	6	0	0
50	370	321	271	222	197	172	148	123	74	24	0

Simulação baseada a partir das equações apresentadas por Santana, Fontan e Oliveira (2014), desenvolvidas a partir do modelo simplificado de balanço nutricional NUTRICALC (NOVAIS *et al.*, 2007). As médias de K e Ca foram de 0,040 e 0,471 cmol_c dm⁻³, respectivamente.

DISCUSSÃO

Os coeficientes de variação indicaram que o P, Mg, Ca, S e K apresentaram maior heterogeneidade (CV > 35%), exigindo maior esforço amostral para representá-los. Esse efeito se deve à ampla variação dos seus teores na área amostrada. A variabilidade desses atributos corrobora o observado por Machado *et al.* (2007); Lima *et al.* (2010) e Oliveira *et al.* (2015).

Assumindo o erro amostral máximo pré-estabelecido de 5%, a quantidade inicial de amostras compostas representou a área total de plantio. Apesar dessa área ser constituída por genótipos com diferentes idades e espaçamentos de plantio, as distribuições de MO e pH foram as mais homogêneas (CV<20%), sendo identificados poucos *outliers* (0,15 a 1,02% das observações). Menor variabilidade desses atributos químicos (CV<12%) para um cultivo de eucalipto também foi verificado por Lima *et al.* (2017). Os *outliers* foram removidos com aplicação de boxplot a fim de concentrar os resultados analíticos mais próximos às respectivas tendências centrais, reduzindo o erro de amostragem. Apesar dos valores médios nutricionais serem relativamente próximos entre as técnicas de análise exploratória para a maioria dos atributos químicos do solo, a probabilidade de obtenção do mesmo valor da média em uma nova amostragem foi maior após a remoção de *outliers*. Ressalta-se que a eliminação de *outliers* deve ser vista com cautela, se possível, considerando aspectos estatísticos e biológicos. A utilização

de limites de referência para a interpretação de análises químicas permite avaliar a coerência de resultados analíticos e identificação de valores discrepantes (CANTARUTTI; ALVAREZ; RIBEIRO, 1999).

Como esperado, a eliminação dos *outliers* reduziu o coeficiente de variação dos atributos químicos; essa redução (em pontos percentuais) se intensificou com o aumento da quantidade de *outliers* removidos ($r = 0,95$; $p \leq 0,05$). Observou-se mais *outliers* relacionados ao Mg (10,77%), seguido do P (8,73%) e Ca (5,68%) (Tabela 1). Os demais atributos químicos tiveram menos de 5% de seus dados identificados como *outliers*. O erro amostral diminuiu em até 1,66 ponto percentual (P, equivalente a 33,40% de redução).

É importante salientar a necessidade de controlar os erros amostrais e não amostrais para minimizar a variação dos resultados analíticos de propriedades do solo. Os erros não amostrais ocorrem quando as amostras são coletadas, registradas ou analisadas erroneamente, originando valores que destoam da tendência central (SHIVER; BORDERS, 1996; HEIM *et al.*, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2014). Diferentes instrumentos e profissionais de coleta, mobilidade de nutrientes, irregularidade de fatores responsáveis pela pedogênese e manejo inadequado do solo contribuem para a variabilidade dos resultados analíticos (ACQUA *et al.*, 2013; NICOLITCH *et al.*, 2016; TIAN *et al.*, 2017). Mesmo no sistema de cultivo mínimo, adubações a lanço, quando desuniformes, ou as em linhas, são atividades que acentuam a variabilidade. A eliminação de toda a amostra composta deve ser considerada quando há indícios de que houve contaminação na coleta ou preparo de material. Sempre que possível, recomenda-se comparar resultados analíticos com o histórico de análises químicas e optar por laboratórios qualificados. Segundo IAC (2018), esse histórico permite observar tendências, acompanhar a evolução da fertilidade, detectar possíveis problemas analíticos e, se necessário, corrigir o manejo do solo.

O maior erro amostral encontrado nas amostras compostas coletadas foi do P ($E = 4,99\%$, $P1 + ACS$) (Tabela 1). A quantidade mínima representativa de amostras compostas calculada para atender ao erro máximo de 5% variou entre os procedimentos de amostragem. Na área em estudo, que apresenta homogeneidade das condições físicas e morfológicas do solo (FERREIRA, 2008), quando se adotou a amostragem casual simples sem *outliers*, a representatividade de todos os atributos químicos foi obtida com 309 u.a. (1:29) (Tabela 2). Essa intensidade amostral foi definida em consonância ao atributo de maior variabilidade; neste caso, Mg (CV de 44,70%). Considerando tal margem de erro, em povoamentos florestais já estabelecidos, sugere-se a divisão da área em glebas homogêneas menores que 29ha para melhor distribuição dos pontos de coleta. De modo similar, outras maneiras de distribuir os

pontos de coleta podem ser encontradas na literatura, como a divisão em glebas nunca maiores que 10 (CANTARUTTI; ALVAREZ; RIBEIRO, 1999) ou 20ha (IAC, 2018). Indica-se o mínimo de 2 amostras compostas em sítios cuja área total é inferior ou igual a 29ha, para evitar riscos com o descarte de algum resultado analítico.

O critério de estratificação mais eficiente se utilizou de duas classes de altitude; mínimo de 295 amostras compostas (1:31, equivalente a 95,47% em relação à ACS), quantidade calculada em consonância ao Mg. Na prática, essa diferença foi relativamente modesta. Salienta-se que a heterogeneidade de propriedades do solo depende da escala analisada (SIQUEIRA *et al.*, 2017). Portanto, é provável que a estratificação se torne bastante vantajosa em outras escalas, inclusive adotando outros critérios para a definição de estratos.

A definição de estratos homogêneos propicia a implementação de diferentes recomendações de fertilização, uma recomendação por estrato. Desde que os estratos discriminem a distribuição dos atributos químicos, tem-se maior acurácia das estimativas nutricionais à medida que se intensifica a estratificação. Consequentemente, a busca pela precisão e acurácia requer investimentos para o planejamento da estratégia de amostragem, treinamento de equipes de campo e controle da qualidade da adubação. Neste cenário, a estratificação por classe de altitude (proporção de 1:31) resultou em 248 u.a. para o estrato de até 1000m e, quando superior a 1000m, em 47 u.a.; admitindo-se o máximo de duas recomendações simultâneas na área amostrada. Enfatiza-se que, para amostragens casuais estratificadas, a alocação das amostras compostas pode também ser realizada proporcionalmente à área de cada estrato (SHIVER; BORDERS, 1996).

A intensidade amostral que representa exclusivamente o Al, MO e pH variou relativamente pouco, ou não se alterou, quando se aplicou o boxplot para a remoção de *outliers*. Logo, não é indicada a estratificação e nem a eliminação de seus *outliers* para atender às respectivas suficiências amostrais. A viabilidade econômica da análise química exclusiva para determinados atributos deve ser investigada com o propósito de reduzir custos analíticos.

Constatou-se a existência de diferenças na taxa de decréscimo da quantidade de u.a. com o aumento do erro amostral. A amostragem se tornou progressivamente mais onerosa à medida que mais amostras compostas foram obtidas para aumentar a precisão. Admitindo maiores erros amostrais para a amostragem casual simples, como 20 ou 30%, a quantidade mínima representativa de todos atributos foi de 20 (1:455) e 9 u.a. (1:1011), respectivamente. Nota-se que a variação de 15 pontos percentuais no erro (de 5 para 20%) reduziu 289 u.a. e de 10 pontos percentuais (de 20 para 30%), apenas 11 u.a.

Tendo em vista uma eventual padronização da quantidade aplicada de calcário e/ou outros resíduos industriais para o fornecimento de Ca e Mg, a representatividade ($E=5\%$, Cenário C2) dos demais atributos foi obtida com o mínimo de 284 (1:32) e 286 u.a. (1:32) para as amostragens casual simples e a estratificada por classes de altitude, respectivamente (Tabelas 2 e 3). Uma prática operacional comum no cultivo de eucalipto de grandes empresas é a utilização de resíduos industriais da cadeia produtiva de celulose e de carvão vegetal/siderurgia para suprir a demanda de Ca e Mg. A aplicação desses resíduos, de forma geral, é padronizada em dose única para todas as unidades de manejo, por se considerar a facilidade operacional e reutilização dos resíduos. De forma similar ao resíduo industrial, a aplicação de doses padrões de calcário dolomítico tem se tornado rotina em áreas florestais, devido aos baixos teores de Ca e Mg nos solos e se adotar o método do balanço nutricional. Por este método, mesmo que o teor de Ca no solo seja de 0 cmolc dm^{-3} , recomenda-se 600 kg ha^{-1} de CaO para se obter uma elevada produtividade, como a de $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (SANTANA; FONTAN; OLIVEIRA, 2014), quantidade equivalente à $2,2 \text{ ton ha}^{-1}$ de calcário dolomítico (30% de CaO).

Nas ocasiões em que o S não seja objeto direto da recomendação, por ser íon acompanhante em fertilizantes, e haja padronização da quantidade aplicada de Ca e Mg, a intensidade amostral para representar os demais atributos ($E=5\%$, Cenário C3) reduz para 270 amostras compostas (1:34) para a amostragem casual estratificada por classes de altitude (Tabelas 2 e 3). Esta premissa se baseou na exclusão dos três atributos químicos no dimensionamento do tamanho da amostra para representar a fertilidade do solo.

A intensidade inicialmente amostrada de 1:13 (687 amostras compostas: 9.101ha) reduziu mais de 50% após a remoção de *outliers*. Este resultado possui grande importância prática, pois demonstra que a amostragem de solo pode ser mais rápida, menos onerosa e laboriosa. A escolha do procedimento de amostragem deve ser planejada considerando a análise exploratória e procedimento amostral, como também, os custos envolvidos com o geoprocessamento, deslocamento, amostragem e análise química.

A quantidade de fertilizantes pode, em alguns casos, variar relativamente pouco ao se adotar maiores erros amostrais na coleta de solo, principalmente, em áreas homogêneas. Na região de estudo, a homogeneidade das condições físicas e morfológicas do solo já foi relatada por Ferreira (2008). Desde que seja previamente analisado o potencial produtivo do sítio, mais K_2O e CaO são recomendados para o alcance de maiores produtividades. Salienta-se que a aplicação exacerbada nem sempre é acompanhada por incrementos na produtividade (SANTOS *et al.*, 2019), pois o crescimento vegetal pode ser limitado por diversos fatores, como o déficit hídrico. É necessário que todos os nutrientes estejam em quantidade equilibrada e

disponibilizados no momento apropriado. A quantidade recomendada de K_2O oscilou menos que a de CaO para os diferentes limites de confiança, indicativo que pode ser representado com menor intensidade amostral. Este fato possui grande importância operacional na agricultura convencional, pois mesmo com um erro amostral de 40%, a recomendação de K_2O variou no máximo 10% em torno da média.

Nas condições em que se deseja a adoção do regime de talhadia, com sucessivas rotações de cultivo, a reposição de nutrientes deve ser planejada para se obter maior retorno produtivo e econômico. Ressalta-se que informações de nutrientes contidos no solo e no vegetal são essenciais para o sucesso da fertilização florestal. A quantidade reposta de nutrientes após a colheita via fertilização pode ser reduzida adotando práticas sustentáveis, como o descascamento em campo, mantendo os resíduos culturais na própria unidade de manejo. No caso da casca de eucalipto, a reposição de Ca reduziria consideravelmente em razão do seu baixo coeficiente de utilização biológico (LAFETÁ. 2012).

O equilíbrio entre a quantidade de amostras compostas a serem obtidas, erros amostrais, erros não amostrais e disponibilidade de recursos é importante para um adequado planejamento da representatividade da fertilidade do solo. Ao negligenciar a representatividade de atributos químicos essenciais para o estabelecimento e crescimento vegetal, as avaliações e decisões silviculturais se tornam imprecisas e podem ser tomadas equivocadamente. A análise de suficiência amostral é crucial para minimizar custos com a amostragem do solo de forma precisa.

CONCLUSÕES

A amostragem casual simples se mostrou eficiente para a amostragem de solo na ampla área de plantio estudada, especialmente, quando se aplicou o boxplot para identificação e remoção de outliers.

A quantidade mínima representativa de amostras compostas para atender ao erro amostral de 5% foi de 309 u.a. para a amostragem casual simples, equivalente a 1 u.a. a cada 29 hectares (1:29). Na amostragem estratificada pela altitude, a quantidade foi de 295 u.a., ou 1:31.

Com vistas à praticidade, representatividade e facilidade de distribuição de amostras compostas de solo, a amostragem casual simples se mostrou mais eficiente do que os critérios adotados para a pós-estratificada.

REFERÊNCIAS

ACQUA, N. H. D.; SILVA, G. P.; BENITES, V. M.; ASSIS, R. L.; SIMON, G. A. Métodos de amostragem de solo em áreas sob plantio direto no Sudoeste Goiano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 2, p. 117-122, 2013.

BRUS, D. J. Balanced sampling: a versatile sampling approach for statistical soil surveys. **Geoderma**, Amsterdam, v. 253-254, p. 111-121, 2015.

CANTARUTTI, R. B.; ALVAREZ V. V. H.; RIBEIRO, A. C. Amostragem do solo. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H., eds. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (5ª Aproximação)**. Viçosa: Ed. UFV, 1999. p. 13-20.

FERREIRA, C. A. **Gênese de “Latossolos Acinzentados” em topossequência de Latossolos das chapadas do Alto Vale do Jequitinhonha, MG**. 2008. 84f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina-MG, 2008.

GÓMEZ, J. A.; GUZMÁN, M. G.; GIRÁLDEZ, J. V.; FERERES, E. The influence of cover crops and tillage on water and sediment yield, and on nutrient, and organic matter losses in a olive orchard on a sandy loam soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 106, p. 137-144, 2009.

GUARÇONI, A.; ALVAREZ, V. H.; SOBREIRA, F. M. Fundamentação teórica dos sistemas de amostragem de solo de acordo com a variabilidade de características químicas. **Terra Latinoamericana**, Chapingo, v. 35, n. 4, 2017.

HEIM, A.; WEHRLI, L.; EUGSTER, W.; SCHMIDT, N. W. I. Effects of sampling design on the probability to detect soil carbon stock changes at the Swiss CarboEurope site Lägeren. **Geoderma**, Amsterdam, v. 149, p. 347-354, 2009.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS (IAC). **Análise do solo, plantas, substratos resíduos e fertilizantes**. Disponível em: < <http://www.iac.sp.gov.br/> > Acesso em: 03 de jan. 2018.

JIMÉNEZ-AGUIRRE, M. T.; ISIDORO, D.; USÓN, A. Soil variability in la Violada Irrigation District (Spain): I delineating soil units for irrigation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 311, p. 78-90, 2018.

LAFETÁ, B. O. **Eficiência nutricional, área foliar e produtividade de plantações de eucalipto em diferentes espaçamentos estimados com redes neurais artificiais**. 2012. 77f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina-MG, 2012.

LEOPIZZI, S.; GONDRET, K.; BOIVIN, P. Spatial variability and sampling requirements of the visual evaluation on soil structure in cropped fields. **Geoderma**, Amsterdam, v. 314, p. 58-62, 2018.

LIEß, M. Sampling for regression-based digital soil mapping: closing the gap between statistical desires and operational applicability. **Spatial Statistics**, Amsterdam, v. 13, p. 106-122, 2015.

LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; SILVA, S. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos químicos do solo em área de vegetação natural em regeneração. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 127-136, 2010.

LIMA, E. S.; MONTANARI, R.; LOVERA, L. H.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; GONZÁLEZ, A. P. Variabilidade espacial das propriedades dendrométricas do eucalipto e atributos químicos de um Neossolo Quartzarênico. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 1, p. 1-11, 2017.

MACHADO, L. O.; LANA, A. M. Q.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C.; FERREIRA, C. V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 591-599, 2007.

NICOLITCH, O.; COLIN, Y.; TURPAULT, M.-P.; UROZ, S. Soil type determines the distribution of nutrient mobilizing bacterial communities in the rhizosphere of beech trees. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 103, p. 429-445, 2016.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. 1 ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017p.

OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JUNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; FREITAS, L.; SIQUEIRA, D. S.; CUNHA, J. M. Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de argissolos da região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 668-681, 2015.

OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JUNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; SIQUEIRA, D. S.; FREITAS, L. Spatial variability and sampling density of chemical

attributes in archaeological black Earth and native forest soil in Manicoré, AM. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 44, n. 4, p. 735-746, 2014.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2017.

RAIJ, B. Van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; ANDRADE, J. C. (eds.) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285p.

SANTANA, R. C.; FONTAN, I. C. I.; OLIVEIRA, S. L. Implantação, manutenção e produtividade dos povoamentos. In: VALE, A. B. do; MACHADO, C. C.; PIRES, J. M. M.; VILAR, M. B.; COSTA, C. B.; NACIF, A. P. (Org.). **Eucaliptocultura no Brasil**: silvicultura, manejo e ambiência. Viçosa: Ed. SIF, 2014. p. 161-186.

SANTOS, E. O. J.; GONTIJO, I.; SILVA, M. B. Planejamento amostral de propriedades química do solo em lavoura de café conilon. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 4, p. 423-431, 2013.

SANTOS, H. C.; OLIVEIRA, F. H. T.; ARRUDA, J. A.; LOPES, A. R. S.; SOUZA JÚNIOR, R. F.; FARIAS, D. R. Amostragem para avaliação da fertilidade solo em função da variabilidade de suas características químicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 849-854, 2009.

SANTOS, P. H. R.; SANTANA, R. C.; OLIVEIRA, M. L. R.; GOMES, F. S. Benchmark: biomass production in *Eucalyptus plantations as a consequence of fertilization*. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 2, e20170606, 2019.

SHIVER, B. D.; BORDERS, B. E. **Sampling techniques for forest resource inventory**. Nova York: John Wiley & Sons, 1996, 356p.

SIQUEIRA, G. M.; SILVA, E. F. F.; VIDAL-VÁZQUEZ, E.; PAZ-GONZÁLES, A. Multifractal and joint multifractal analysis of general soil properties and altitude along transect. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, p. 1-16, 2017.

TIAN, L.; ZHAO, L.; WU, X.; FANG, H.; ZHAO, Y.; YUE, G.; LIU, G.; CHEN, HAO. Vertical patterns and controls of soil nutrients in alpine grassland: implications for nutrient uptake. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 607-608, p. 855-864, 2017.

WASTOWSKI, A. D.; ROSA, G. M.; CHERUBIN, M. R, RIGON, J. P. G. Caracterização dos níveis de elementos químicos em solo, submetido a diferentes sistemas de uso e manejo, utilizando espectrometria de fluorescência de raios-x por energia dispersiva (EDXRF). **Química Nova**, São Paulo, v. 33, n. 7, p. 1449-1452, 2010.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O manuscrito buscou dimensionar o número mínimo de amostras compostas para representar a fertilidade de solos florestais, sendo adotado um procedimento específico para a obtenção de amostras simples. No caso do manuscrito, cada amostra composta foi constituída pela mistura homogênea de cinco simples, coletadas de maneira aleatória nas entrelinhas de plantio (uma simples por entrelinha). Portanto, encoraja-se o desenvolvimento de mais pesquisas sobre o dimensionamento da quantidade de amostras compostas adotando outras metodologias para a coleta de amostras simples.

É provável que a variabilidade dos atributos químicos solo se divirja entre o preparo e condução de culturas anuais e perenes, principalmente em área de maior heterogeneidade das características químicas e físicas do solo. Indicam-se o desenvolvimento de pesquisas e estudos prévios particulares para culturas de interesse, com o propósito de melhor precisão, alocação e racionalização do uso de insumos.

CAPÍTULO III

BROTAÇÕES DE EUCALIPTO EM ÁREA DE EMPILHAMENTO DE MADEIRA

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Após as análises da produção de eucalipto em diferentes rotações, sítios e arranjos espaciais (Capítulo 1) e de representatividade da fertilidade de solos florestais (Capítulo 2), deu-se continuidade a busca de prováveis causas do declínio da produtividade em segundas rotações na região do Vale do Jequitinhonha em Minas Gerais.

A ideia surgiu a partir de observações cotidianas de funcionários de uma empresa florestal, que relatavam a possibilidade de declínio da produtividade na segunda rotação devido à presença de pilhas de madeira às margens de talhões. Neste ambiente com pilhas de madeira, as cepas estão sujeitas ao sombreamento e a limitações físicas para a emissão de brotos, encontrando-se cepas descascadas, lascadas ou com espeto (lascas desprendidas de toras).

RESUMO

O objetivo foi avaliar o efeito da presença de pilhas de madeira na distribuição de diâmetros e área basal às margens de eucaliptais. Selecionaram-se 6 talhões comerciais para o corte e baldeio. As toras foram removidas do interior dos talhões aos 2 meses após o corte e conduzidas para o empilhamento às suas margens. As pilhas de madeira foram retiradas das margens aos 5 meses após o corte. Realizaram-se duas desbrotas, aos 6 e 12 meses após o corte. Definiram-se três classes de idade: CI) 44 a 48; CII) 56 a 57 e CIII) 71 a 72 meses. Realizaram-se medições de DAP e levantamento de falhas nas regiões de interior e margens dos talhões, onde se mantiveram pilhas de madeira após o baldeio. Efetuou-se a estatística descritiva e análise da distribuição de diâmetros. A porcentagem de falhas às margens foi quatro vezes maior que aquela do interior. Na classe CIII, a área basal no interior dos talhões foi de $16,90\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$ e às margens, de $18,85\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$. Conclui-se que as margens onde se mantem pilhas de madeira apresentam maior variabilidade de diâmetros em relação ao interior de talhões. Essas margens não exibiram menor área basal que o interior dos talhões.

Palavras-chave: Área basal. Distribuição de diâmetros. Pilhas de madeira. Talhadia.

EUCALYPT SPROUTS IN WOOD STACKING AREA

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the effect of woodpiles presence in diametric distribution and basal area at the eucalypt stands margins. Six commercial stands were select for cutting and traffic to the stand margins. The logs were remove from the stand interior at 2 months after cutting and conducted to stacking to their margins. The woodpiles were remove from the margins at 5 months after cutting. Two sprouting were perform, at 6 and 12 months after cutting. Three age classes were define: CI) from 44 to 48 months, CII) from 56 to 57 months and CIII from 71 to 72 months. DBH measurements and failures surveys were carried out in the interior and stand margins, where woodpiles were kept after traffic. Descriptive statistics and analysis of diametric distribution were performed. Failures percentage at the margins was approximately four times greater than that of interior. In class CIII, basal area in stands interior was $16.90\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$ and at the margins, $18.85\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$. It was conclude that margins where woodpiles are kept present greater variability of diameters in relation to the interior of stands. These margins exhibited no smaller basal area than the interior of stands.

Keywords: Basal area. Diameter distribution. Woodpiles. Coppice.

INTRODUÇÃO

Os sistemas silviculturais relacionados à exploração e condução de talhões devem ser planejados a fim de se obter a máxima produtividade e retorno econômico. O manejo de plantações de eucalipto sob regime de talhadia é uma atividade comum no Brasil, utilizando-se da capacidade natural de regeneração e rápido crescimento do genótipo para uma nova rotação e ampliação do ciclo de cultivo (ROCHA *et al.*, 2018). Entretanto, tem-se a expectativa de que a produção da talhadia possa ser comprometida em talhões com muitas cepas danificadas e/ou mortas pela colheita florestal (FERRAZ FILHO; SCOLFORO; MOLA-YUDEGO, 2014; SOUZA *et al.*, 2016; SPINELLI *et al.*, 2017).

A possibilidade de declínio na produtividade volumétrica de rotações sucessivas em relação àquela primeira tem estimulado a busca de prováveis causas e soluções para a talhadia. A avaliação da qualidade operacional da colheita é normalmente realizada no interior de talhões e por curtos períodos de tempo, na maioria das ocasiões, inferiores a 12 meses. A

operação de baldeio é uma atividade de transporte primário para a remoção da madeira de dentro dos talhões até as suas margens ou beira de estradas. Não é difícil encontrar pilhas de madeira às margens de talhões dispostas perpendicularmente (\perp) à orientação de estradas em grandes empresas florestais, formando feixes simples ou duplo de toras.

As pilhas de madeira são frequentemente mantidas às margens de talhões por períodos superiores a três meses para a redução de umidade da tora recém colhida e/ou devido aspectos logísticos. A redução de umidade nos primeiros 30 dias de secagem natural pode atingir até a metade da umidade inicial (STANGERLIN *et al.*, 2009; LIEBL *et al.* 2017). Tal redução de umidade facilita o transporte secundário, reduz o tempo no pátio de secagem próximo a carvoaria e melhora o aproveitamento da carbonização. Menores umidades implicam em toras mais leves a serem transportadas e aumento do rendimento gravimétrico e qualidade do carvão produzido.

Todavia, nos ambientes com pilhas de madeira, as cepas estão sujeitas ao sombreamento e a limitações físicas para a emissão de brotos, encontrando-se cepas descascadas, lascadas ou com espeto (lascas desprendidas de toras). Conforme Spinelli *et al.* (2017), a colheita mecanizada torna-se um empecilho para a talhadia quando muitas cepas são danificadas, prejudicando o desenvolvimento de brotos. Não obstante, ainda, persistem dúvidas sobre as consequências da presença de pilhas de madeira às margens de talhões na distribuição de diâmetros e área basal da talhadia.

As implicações do desenvolvimento arbóreo na distribuição de diâmetros ainda não estão completamente elucidadas (STAPE *et al.*, 2010; BOURDIER *et al.*, 2016; KIM; BULLOCK; STAPE, 2016; RESENDE *et al.*, 2016; SOARES *et al.*, 2017; RESENDE *et al.*, 2018), sobretudo, em áreas onde se mantem pilhas de madeira após o baldeio. O agrupamento do diâmetro de fustes em classes de tamanho é uma técnica eficiente para caracterizar a estrutura de povoamentos florestais (CASTRO *et al.*, 2016). A modelagem dessa distribuição é normalmente feita empregando funções densidade de probabilidade (f.d.p.), cujo ajuste fornece estimativas da probabilidade de frequência associada a cada classe de tamanho (DIAMANTOPOULOU *et al.*, 2015).

Embora existam na literatura florestal diversas f.d.p., o enfoque da modelagem da distribuição de diâmetros continua sendo uma das formas da função Weibull, ajustada predominantemente pelo método da máxima verossimilhança (CAMPOS; LEITE, 2017). O intenso uso dessa função relaciona-se a sua flexibilidade para assumir diferentes formas e assimetrias, moldando diversas tendências de distribuição, desde exponencial até a normal (BAILEY; DELL, 1973; LEITE *et al.*, 2010). Além disso, a facilidade de ajustamento e a

correlação de seus parâmetros com atributos do povoamento são características relevantes que favorecem seu emprego (LEITE *et al.*, 2010; DIAMANTOPOULOU *et al.*, 2015).

O conhecimento da distribuição de diâmetros em povoamentos conduzidos sob talhadia, que tiveram parte de sua área destinada ao empilhamento de madeira, contribui para melhorias na tomada de decisões silviculturais. Mediante o exposto, as seguintes hipóteses foram testadas: i) a distribuição de diâmetros às margens de talhões manejados sob talhadia, onde se mantém pilhas de madeira após o baldeio, não difere daquela do seu interior? ii) a área basal às margens desses talhões não se altera em relação àquela do seu interior? O objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito da presença de pilhas de madeira na distribuição de diâmetros e área basal às margens de talhões de eucalipto.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido em povoamentos clonais de eucalipto manejados sob regime de talhadia, pertencentes a uma empresa florestal, localizados no município de Itamarandiba-MG. Os talhões situam-se entre 850 a 1.000m de altitude, em solos de textura muito argilosa e sob clima Cwa na classificação internacional de Köppen. Para o período de 1961 a 2017, as médias anuais de temperatura, precipitação, evaporação total e umidade relativa do ar foram de 20 °C, 1.092 mm, 1.032 mm e 78%, respectivamente (Instituto Nacional de Meteorologia).

Selecionaram-se 6 talhões comerciais, estabelecidos no arranjo espacial de 3,0 x 2,8 m (8,40 m²), para o corte mecanizado e baldeio de toras até às suas margens. As toras foram removidas do interior dos talhões aos 2 meses após o corte. O sistema de colheita adotado foi o de toras curtas (*Cut-To-Length*, CTL), toras com 3,2m de comprimento. As pilhas de madeira foram dispostas às margens dos talhões, perpendicularmente (\perp) à orientação de estradas e em feixes duplos com a altura máxima de 2m. As pilhas de madeira foram retiradas das margens dos talhões aos 5 meses após o corte. A primeira desbrota foi realizada aos 6 meses após o corte, deixando-se um broto por cepa e, em caso de falha, na planta subsequente, dois brotos por cepa. Logo após 6 meses, efetuou-se a segunda desbrota para a remoção de broto “ladrao”. A seleção dos melhores brotos se baseou no maior comprimento e vigor fisiológico.

Os talhões apresentavam idades distintas de talhadia, de 44 a 72 meses. Portanto, definiram-se três classes de idade, assim caracterizadas: CI) de 44 a 48 meses; CII) de 56 a 57 meses e CIII) de 71 a 72 meses. Cada classe de idade foi constituída por dois talhões. A área

total de cultivo representada em cada classe de idade (soma da área de dois talhões) foi de 97,67 ha, 67,10 ha e 81,74 ha, respectivamente.

Foram distribuídas 32 parcelas retangulares com área de 600 m² (30 x 20 m), 16 unidades amostrais no interior dos talhões, pertencentes ao Inventário Florestal Contínuo (IFC) da empresa. O restante das unidades amostrais (16 parcelas) foi lançado aleatoriamente às margens, exatamente na área onde se manteve pilhas de madeira após o baldeio. Foram cedidas informações apenas da porcentagem de falhas e do diâmetro à altura de 1,3 m do solo (DAP, cm) de todos os fustes inventariados (1.914 fustes). Totalizaram-se 6 combinações entre as três classes de idade e as duas regiões de talhão (interior e margem).

A análise da distribuição de diâmetros de cada combinação foi realizada agrupando os fustes em intervalos regulares de 1,0 cm de diâmetro. Para modelar a frequência diamétrica por combinação, adotou-se a f.d.p. Weibull de dois parâmetros (parâmetro limiar da menor classe de diâmetro fixado a zero). A função descrita a seguir foi ajustada pelo método da máxima verossimilhança, utilizando o procedimento de otimização de Nelder e Mead:

$$f(x) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\gamma}}$$

em que:

$f(x)$ = função densidade de probabilidade Weibull;

x = centro de classe de diâmetro (cm), $x \geq 0$; e

γ e β = parâmetros de forma e escala, respectivamente.

A aderência da função aos dados foi avaliada pelo teste Kolmogorov-Smirnov (GIBBONS; SUBHABRATA, 1992). A estatística desse teste (dn) é dada pela maior diferença entre as frequências acumuladas estimada e observada. Calcularam-se a Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM), Média Absoluta dos Erros (MAE) e coeficiente de correlação de Pearson ($r_{Y\hat{Y}}$). Realizou-se a análise gráfica entre valores observados e estimados pela função ajustada.

Aplicou-se o teste de identidade de modelos desenvolvido por Graybill (1976) para identificar a igualdade estatística entre as distribuições de diâmetros estimadas para o interior e margens dos talhões. Essa hipótese foi testada pela estatística F e sua não rejeição ($F_{H0} < F_{\alpha}$), a uma significância α , permite admitir que as distribuições de frequência não diferem entre si.

Realizou-se estatística descritiva para cada combinação, empregando assimetria, quantidade de falhas (%), mínimo (DAP_{min}, cm), máximo (DAP_{max}, cm), diâmetro médio (\bar{q} , cm) e área basal (B, m² ha⁻¹). A assimetria foi calculada pelo método dos momentos. Para fins

descritivos, a diferença absoluta entre as estimativas de frequência relativa da margem e interior dos talhões foi calculada por classe de diâmetro.

Para diagnóstico de efeito estatístico, foi adotado o nível de significância de 5% em todas as análises. Estas foram efetuadas empregando o *software* R 3.5.2 (R CORE TEAM, 2018), por meio dos pacotes estatísticos Stats, EnvStats, fitdistrplus e Metrics.

RESULTADOS

Todos os ajustes realizados com a função Weibull apresentaram aderência pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Os valores médios da estatística de teste d_n foram de 0,2626 e 0,2213 para as regiões de interior e margens dos talhões, onde se manteve pilhas de madeira após o baldeio, respectivamente. Os ajustes apresentaram poucos desvios, com baixos valores de RQEM e MAE (Tabela 1). Os coeficientes de correlação foram altos (acima de 0,90) e significativos ($p \leq 0,05$). Os parâmetros da função ajustada para as margens dos talhões tiveram maior amplitude de variação; as amplitudes foram de 3,1883 e 5,2598 para os parâmetros de forma e de escala, respectivamente.

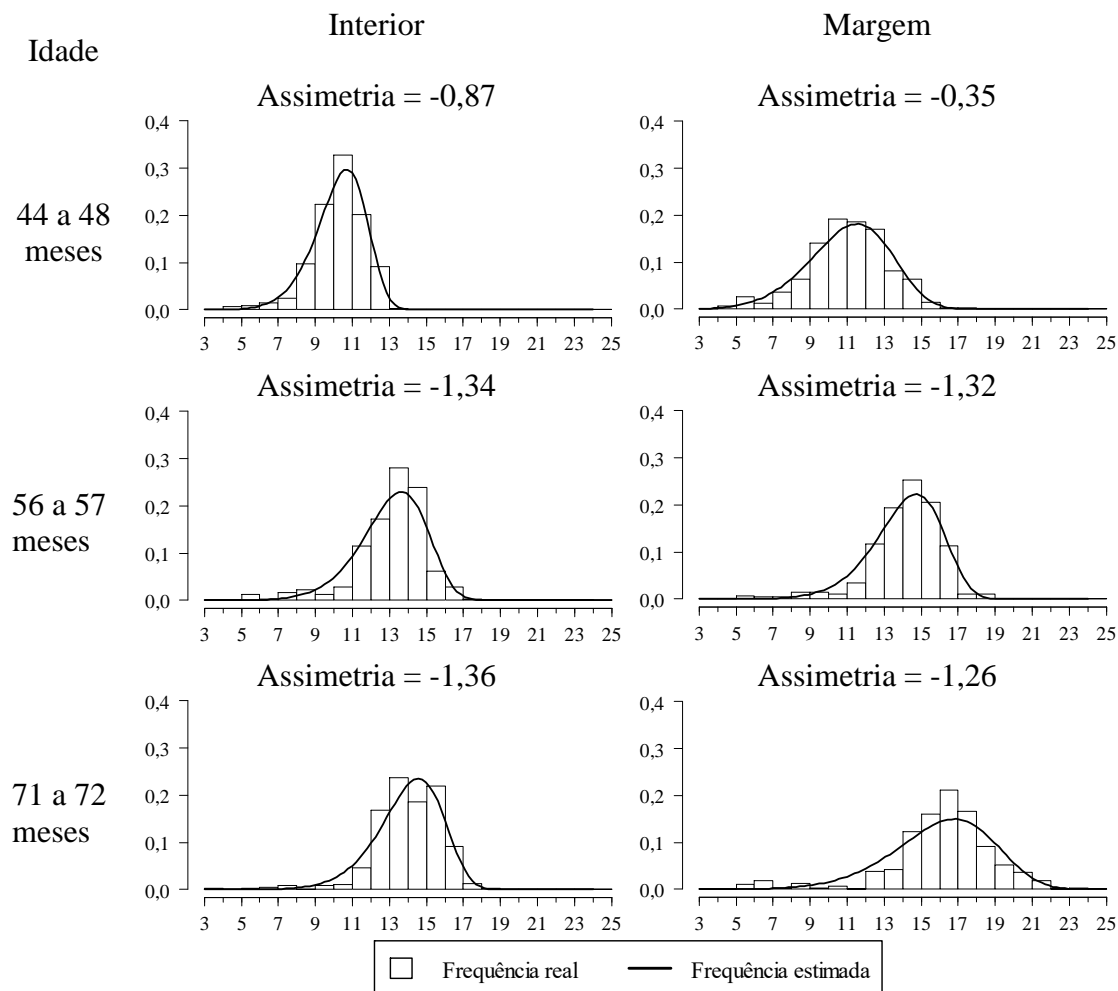
Tabela 1 – Parâmetros e estatísticas de ajuste da função Weibull para o interior (parcelas do inventário florestal contínuo) e margens de talhões de eucalipto, onde se mantiveram pilhas de madeira após o baldeio.

Região	γ	β	RQEM	MAE	$r_{Y\hat{Y}}$	dn
----- 44 a 48 meses -----						
Interior	8,7222	10,8526	0,0186	0,0141	0,9854*	0,2000 ^{ns}
Margens	5,7789	11,9135	0,0152	0,0119	0,9765*	0,1429 ^{ns}
----- 56 a 57 meses -----						
Interior	8,6012	13,8474	0,0259	0,0197	0,9628*	0,2308 ^{ns}
Margens	8,9672	14,9214	0,0161	0,0118	0,9848*	0,2857 ^{ns}
----- 71 a 72 meses -----						
Interior	9,3844	14,7493	0,0233	0,0168	0,9640*	0,3571 ^{ns}
Margens	6,9096	17,1733	0,0232	0,0176	0,9400*	0,2353 ^{ns}

* = significativo ($p \leq 0,05$); ^{ns} = não significativo ($p > 0,05$); γ e β = parâmetros de forma e escala da função Weibull, respectivamente; RQEM = raiz quadrada do erro médio; MAE = média absoluta dos erros; $r_{Y\hat{Y}}$ = coeficiente de correlação de Pearson; e dn = estatística do teste Kolmogorov-Smirnov.

O módulo de assimetria da distribuição de diâmetros observada no interior dos talhões aumentou com a idade (Figura 1). Todas as distribuições apresentaram assimetria negativa (ou à esquerda). A assimetria das distribuições às margens dos talhões foi mais próxima a 0 (zero). Em geral, as curvas geradas para o interior dos talhões foram menos achatadas que aquelas das margens. Pela análise gráfica, verificou-se que os ajustes da função Weibull representaram adequadamente as distribuições de diâmetro para as diferentes idades e regiões de talhão.

Figura 1 – Frequências relativas observada e estimada pela função Weibull (eixo y) por classe de diâmetro (eixo x). Os valores de assimetria foram calculados para a frequência observada. Interior dos talhões de eucalipto (parcelas do inventário florestal contínuo) à esquerda e margens dos talhões, onde se mantiveram pilhas de madeira após o baldeio, à direita.



O resultado do teste F Graybill evidenciou diferença não significativa ($p > 0,05$) apenas entre as distribuições de diâmetros estimadas para o interior e margens dos talhões referente a classe de idade de 56 a 57 meses. A porcentagem de falhas às margens dos talhões foi, aproximadamente, quatro vezes maior que aquela do interior (Tabela 2). Observou-se maior diâmetro médio às margens dos talhões onde se mantiveram pilhas de madeira após o baldeio. Nesta região, também, encontrou-se maior frequência relativa de fustes com DAP superior a 16 cm (Tabela 3). A soma de áreas seccionais dos fustes com DAP superior ou igual a mediana de diâmetros representou mais que 50% da área basal total. Obteve-se o percentual de diminuição da área basal total de talhões, para cenários com diferentes proporções de margem com madeira empilhada e intensidades de redução de área basal (Tabela 4).

Tabela 2 – Caracterização de interior (parcelas do inventário florestal contínuo) e margens de talhões de eucalipto, onde se mantiveram pilhas de madeira após o baldeio.

Idade (meses)	Falhas (%)	DAP _{min} (cm)	DAP _{máx} (cm)	q (cm)	B (m ² ha ⁻¹)		
					<DAP _{med}	≥DAP _{med}	Total
----- Interior -----							
44 a 48	4,82	4,84	13,37	10,33	3,57	5,44	9,00
56 a 57	5,26	5,57	17,19	13,19	5,00	7,89	12,89
71 a 72	5,06	3,82	18,14	14,14	6,65	10,26	16,90
----- Margens -----							
44 a 48	18,58	4,14	17,57	11,23	3,69	6,91	10,61
56 a 57	21,17	5,73	18,78	14,25	5,05	7,52	12,58
71 a 72	24,01	5,19	23,55	16,33	7,13	11,72	18,85

DAP_{min} = DAP mínimo; DAP_{máx} = diâmetro máximo; q = diâmetro médio; B = área basal; e DAP_{med} = mediana da distribuição de diâmetros observada dos fustes.

Tabela 3 – Resumo da diferença absoluta entre estimativas de frequência relativa da margem, onde se mantiveram pilhas de madeira após o baldeio, e interior (parcelas do inventário florestal contínuo) de talhões de eucalipto.

Idade (meses)	Centros de classe de diâmetro						
	3,5cm	4,5cm	5,5cm	6,5cm	7,5cm	8,5cm	9,5cm
44 a 48	0,0013	0,0037	0,0077	0,0108	0,0051	-0,0243	-0,0847
56 a 57	0,0000	-0,0001	-0,0003	-0,0012	-0,0033	-0,0082	-0,0179
71 a 72	0,0000	0,0001	0,0003	0,0006	0,0008	0,0000	-0,0037
	10,5cm	11,5cm	12,5cm	13,5cm	14,5cm	15,5 cm	16,5cm
44 a 48	-0,1304	-0,0583	0,0855	0,1071	0,0552	0,0176	0,0032
56 a 57	-0,0341	-0,0551	-0,0689	-0,0491	0,0212	0,0946	0,0882
71 a 72	-0,0141	-0,0364	-0,0735	-0,1157	-0,1267	-0,0619	0,0559
	17,5cm	18,5cm	19,5cm	20,5cm	21,5cm	22,5cm	23,5cm
44 a 48	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
56 a 57	0,0308	0,0034	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
71 a 72	0,1256	0,1163	0,0769	0,0383	0,0135	0,0031	0,0004

Tabela 4 – Percentual de diminuição da área basal total de talhões, para cenários com diferentes proporções de margens com pilhas de madeira e intensidades de redução de área basal.

Proporções de margem com madeira empilhada	Redução de área basal às margens com madeira empilhada					
	0%	10%	20%	30%	40%	50%
	----- % -----					
0%	0	0	0	0	0	0
10%	0	1	2	3	4	5
20%	0	2	4	6	8	10
30%	0	3	6	9	12	15
40%	0	4	8	12	16	20
50%	0	5	10	15	20	25

DISCUSSÃO

A aderência da função Weibull aos dados demonstrou sua flexibilidade em descrever a estrutura diamétrica ao longo do tempo, mesmo às margens de talhões com frequência de falhas de até 24%. Os valores da estatística dn não se divergiram expressivamente entre as regiões de talhão. Entretanto, as médias de probabilidade associadas ao teste de Kolmogorov-Smirnov foram de 73,59 e 78,35% para os ajustes do interior e margens dos talhões, respectivamente.

As estatísticas dos ajustes (Tabela 1) mostraram que os parâmetros de forma e escala não foram tendenciosos ($RQEM < 2,60\%$ e $MAE < 1,98\%$), confirmado pela análise gráfica (Figura 1). Os maiores erros percentuais estiveram associados às menores classes de diâmetro, sobretudo, às margens dos talhões com 71 a 72 meses. A desuniformidade da taxa de crescimento de fustes menores é comum, uma vez que estão mais propensos aos efeitos da competição (REIS *et al.*, 2016).

A presença de pilhas de madeira após o baldeio pode ter influenciado a heterogeneidade do diâmetro de fustes às margens dos talhões. Esta afirmação se baseou na premissa de que houve acentuado percentual de falhas nessa região, muito além do encontrado para o interior de talhões comerciais e do esperado para suas margens sem madeira empilhada. O parâmetro de escala, que representa a amplitude da distribuição, aumentou com o envelhecimento dos talhões. A ocorrência de fustes em maiores classes de diâmetro foi mais pronunciada às margens; em média, a amplitude de variação diamétrica foi 1,3 vez maior que aquela do interior. As distribuições de diâmetros às margens dos talhões afastaram menos do eixo de simetria. Os valores do parâmetro de forma denotaram assimetria negativa, revelando um acúmulo de fustes com maiores dimensões. Esta afirmação pautou-se na premissa de que

valores do parâmetro de forma acima de 3,6 tornam a assimetria progressivamente mais negativa (BAILEY; DELL, 1973).

O comportamento das curvas geradas para as diferentes combinações de classe de idade e regiões de talhão estão em conformidade com o desenvolvimento biológico esperado. As distribuições obtidas seguiram o comportamento típico de povoamentos equiâneos; a frequência de fustes tendeu a aumentar nas maiores classes de diâmetro ao longo da idade, deslocando as curvas para a direita. Observou-se um achatamento das curvas nas maiores idades. É importante ressaltar que o inventário não contemplou medições periódicas da mesma unidade de manejo, os talhões amostrados se encontravam em diferentes estágios de desenvolvimento.

Comparando as distribuições estimadas entre interior e margens dos talhões, a similaridade foi constatada apenas na classe de 56 a 57 meses ($p > 0,05$). É plausível assumir que o interior dos talhões tivesse mais área basal nos primeiros anos de talhadia em virtude da menor frequência de falhas. Após 44 meses, a retomada do crescimento diamétrico às margens resultou em área basal superior à do interior. É conveniente dizer que a área basal é uma métrica de dominância fortemente correlacionada com o volume e biomassa florestal (CAMPOS; LEITE, 2017). A maior frequência de fustes nas classes de diâmetro superiores foi relevante para que as margens exibissem mais área basal (Tabela 2).

A divergência do diâmetro médio entre margem e interior dos talhões se ampliou com a idade, devido sobretudo à intensificação da competição nesta região. O diâmetro médio se correlacionou-se com a área basal total ($r_{Y\hat{Y}} = 0,9194$, $p = 0,0095$). Ressalta-se que o diâmetro médio é uma métrica que dá maior peso aos fustes de maior área seccional. A presença de pilhas de madeira nas margens desfavoreceu a sobrevivência e desenvolvimento de brotos; a grande presença de falhas disponibilizou espaço para o crescimento de fustes remanescentes e, provavelmente, retardou o fechamento de dossel. É natural que os fustes às margens de talhões sejam maiores diametricamente, pois recebem mais radiação solar. Salienta-se que o direcionamento de reservas vegetais para o crescimento em diâmetro ocorre, principalmente, quando a planta reduz seus investimentos em altura para ultrapassar dosséis a procura de luz (D'ALBERTAS *et al.*, 2018).

A presença de fustes com diâmetros dominantes e codominantes foi identificada, sendo mais frequentes às margens dos talhões. Na classe de idade de 71 a 72 meses, a frequência relativa de fustes no intervalo de 18 a 24cm foi maior às margens (24,94%) que no interior dos talhões (0,10%) (Tabela 3). Estimou-se a porcentagem de área basal contida nesse intervalo diamétrico através de relações multiplicativas com a quantidade de fustes, estimativas de

frequência e área seccional dos centros de classe de diâmetro. Logo, obtiveram-se os somatórios de 35,26% e 0,17% de área basal total nas margens e interior, respectivamente.

De 71 a 72 meses, a amplitude formada pelas duas classes diamétricas mais frequentes foi de 14 a 16cm no interior dos talhões (43,13% dos fustes e 48,52% da área basal) e de 16 a 18cm, às margens (29,27% dos fustes e 31,90% da área basal). A estrutura diamétrica reflete o funcionamento do povoamento florestal e sua avaliação temporal revela processos que atuam na dinâmica de crescimento (SOARES *et al.*, 2017). Assim, pode-se afirmar que o ritmo de crescimento de fustes foi distinto entre regiões de talhão.

Uma hipótese a ser considerada é a de que os fustes às margens dos talhões onde se mantiveram pilhas de madeira e contidos nas classes superiores de diâmetro tenham exibido maior ritmo de crescimento que aqueles do interior. Esta hipótese corrobora com a premissa de que a velocidade do crescimento radial de fustes dominantes (mais eficientes na relação fotossíntese/respiração) se intensifica com o aumento da área útil por planta (BINKLEY *et al.*, 2010; SOARES *et al.*, 2017; RESENDE *et al.*, 2018). Enfatiza-se que o ritmo de crescimento de árvores maiores influencia positivamente a produtividade de povoamentos, independentemente da heterogeneidade (RESENDE *et al.*, 2018). Além disso, trata-se de uma dinâmica de crescimento que pode interferir na assimetria de distribuições de diâmetros em povoamentos equiâneos (BINOTI; BINOTI; LEITE, 2015), condizente com os valores de assimetria apresentados na Figura 1.

A amplitude total de variação diamétrica foi maior às margens onde se mantiveram pilhas de madeira. Nesta região, a ocorrência de fustes nas classes inferiores de diâmetro foi consequência da supressão por fustes maiores e/ou de limitações ao crescimento impostas pela presença de pilhas de madeira. Alguns fustes não acompanharam o desenvolvimento dos demais, contribuindo para aumentar a variabilidade da estrutura diamétrica; a presença de fustes suprimidos foi confirmada até os 72 meses de idade.

Um aspecto a se considerar é o de que, na classe de idade de 71 a 72 meses, a frequência de fustes no intervalo de até 10 cm de diâmetro variou relativamente pouco entre regiões de talhão; as frequências relativas foram de 2,32% às margens e de 2,49%, para o interior. Esse fato pode ter refletido na assimetria negativa das distribuições, com cauda à esquerda. Em média, as diferenças absolutas da margem em relação ao interior foi de $0,28 \pm 1,04$ cm para o diâmetro mínimo e de $3,73 \pm 1,95$ cm, para o diâmetro máximo. Logo, o efeito da presença de pilhas de madeira às margens foi mais proeminente na frequência de fustes contidos nas maiores classes de diâmetro, que apresentam mais área seccional.

A heterogeneidade estrutural condiciona a hierarquia de tamanho entre fustes e influencia a competição em povoamentos florestais (BOURDIER *et al.*, 2016). De modo geral, a presença de pilhas de madeira às margens provocou distribuições de diâmetros contrastantes em relação àquela do interior dos talhões. Entretanto, a variabilidade diamétrica de fustes não foi acompanhada em declínio de área basal. A área basal foi maior à medida que aumentou a amplitude de variação do diâmetro ($r_{Y\varphi} = 0,8739$, $p = 0,0229$). Atualmente, o replantio tem sido recomendado para áreas com a presença de falhas e/ou mortalidade e/ou plantas danificadas superior a 3 ou 5%. Por outro lado, mesmo com a expressiva quantidade de falhas às margens, constatou-se que a compensação em área basal transcorreu até o final da rotação.

Inventários florestais são rotineiramente feitos com o lançamento de parcelas no interior de talhões, negligenciando-se as margens. Nas condições de estudo, a presença de pilhas de madeira não reduziu a área basal dos talhões. No entanto, essa análise deve ser vista com atenção por gestores, devido a variações de material genético, condições ambientais e tratamentos silviculturais. O espaço destinado ao empilhamento da madeira utiliza apenas parte das margens de talhões ou pátios de secagem e/ou armazenamento; a empresa florestal em questão usa em torno de 5% da área de unidades de manejo para tal finalidade. Diante de eventuais perdas em área basal com o empilhamento de madeira às margens, espera-se que essa redução se intensifique com o aumento do percentual de área ocupada por pilhas de madeira (Tabela 4). O conhecimento da variabilidade estrutural é um avanço quanto a qualidade de informações sobre o desenvolvimento de fustes em povoamentos equiâneos, embasando a tomada de decisões relacionadas à colheita florestal e silvicultura. Os resultados obtidos fornecem subsídios para o desenvolvimento de novas pesquisas que abordem a relação da heterogeneidade do tamanho de fustes com a produtividade de talhões sob regime de talhadia.

CONCLUSÕES

As margens de talhões, onde se mantem pilhas de madeira após o baldeio, apresentam maior variabilidade de diâmetros em relação ao seu interior. Essas margens apresentam frequência relativa de fustes nas maiores classes de diâmetro superior àquela do interior. A frequência de fustes nas menores classes de diâmetro varia pouco entre ambas regiões de talhão.

Em idades avançadas, a área basal de brotações às margens de talhões, onde se mantem pilhas de madeira após o baldeio, não é menor em relação àquela do seu interior.

REFERÊNCIAS

- BAILEY, R. L.; DELL, T. T. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. **Forest Science**, Bethesda, v. 19, n. 2, p. 97-104, 1973.
- BINKLEY, D.; STAPE, J. L.; BAUERLE, W. L.; RYAN, M. G. Explaining growth of individual trees: light interception and efficiency of light use by *Eucalyptus* at four sites in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1704-1713, 2010.
- BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Análise da função log-logística para modelagem da distribuição de diâmetros. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 39, n. 5, p. 943-951, 2015.
- BOURDIER, T.; CORDONNIER, T.; KUNSTLER, G.; PIEDALLU, C.; LAGARRIGUES, G.; COURBAUD, B. Tree size inequality reduces forest productivity: an analysis combining inventory data for ten European species and a light competition model. **PLoS ONE**, Berkeley, v. 11, n. 3, p. 1-14, 2016.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 5. ed. Viçosa: Ed., 2017. 636p.
- CASTRO, R. V. O.; ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; LEITE, H. G.; CASTRO, A. F. N. M.; NOGUEIRA, G. S.; COSTA, L. S. Função gama generalizada para descrever a distribuição diamétrica de um povoamento de eucalipto. **Floresta**, Curitiba, v. 46, n. 1, p. 67-73, 2016.
- D'ALBERTAS, F.; COSTA, K.; ROMITELLI, I.; BARBOSA, J. M.; VIEIRA, S. A.; METZGER, J. P. Lack of evidence of edge age and additive edge effects on carbon stocks in a tropical forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 407, p. 57-65, 2018.
- DIAMANTOPOULOU, M. J.; ÖZÇELİK, R.; CRESCENTE-CAMPO, F.; ELER, Ü. Estimation of Weibull function parameters for modelling tree diameter distribution using least squares and artificial neural networks methods. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 133, p. 33-45, 2015.
- FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S.; MOLA-YUDEGO, B. The coppice-with-standards silvicultural system as applied to *Eucalyptus* plantations – review. **Journal of Forestry Research**, Amsterdam, v. 25, n. 2, p. 237-248, 2014.
- GIBBONS, J. D.; SUBHABRATA, C. **Nonparametric statistical inference**. 3. ed. New York: Marcel Dekker, 1992. 544p. (Statistics: Textbook and Monograph, 31).

GRAYBILL, F. A. **Theory and application of the linear model**. Belmont: Duxbury Press, 1976. 704p.

KIM, T. J.; BULLOCK, B. P.; STAPE, J. L. Effects of silvicultural treatments on temporal variations of spatial autocorrelation in *Eucalyptus* plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 380, p. 50-58, 2016.

LEITE, H. G.; BINOTI, D. H. B.; GUIMARÃES, D. P.; SILVA, M. L. M.; GARCIA, S. L. R. Avaliação do ajuste das funções Weibull e hiperbólica a dados de povoamentos de eucalipto submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 305-311, 2010.

LIEBL, O. A.; LOIOLA, P. L.; ZEN, L. R.; KLITZKE, R. J.; ROCHA, M. P. Influência dos parâmetros dimensionais da pilha na qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp. submetida à secagem ao ar. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, p. 1-10, 2017.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2018.

REIS, L. P.; SOUZA, A. L.; MAZZEI, L.; REIS, P. C. M.; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; TORRES, C. M. M. E.; SILVA, L. F.; RUSCHEL, A. R. Prognosis on the diameter of individual trees on the eastern region of the amazon using artificial neural networks. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 382, p. 161-167, 2016.

RESENDE, R. T.; MARCATTI, G. E.; PINTO, D. S.; TAKAHASHI, E. K.; CRUZ, C. D.; RESENDE, M. D. V. Intra-genotypic competition of *Eucalyptus* clones generated by environmental heterogeneity can optimize productivity in forest stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 380, p. 50-58, 2016.

RESENDE, R. T.; SOARES, A. A. V.; FORRESTER, D. I.; MARCATTI, G. E.; SANTOS, A. R.; TAKAHASHI, E. K.; SILVA, F. F.; GRATTAPAGLIA, D.; RESENDE, M. D. V.; LEITE, H. G. Environmental uniformity, site quality and tree competition Interact to determine stand productivity of clonal *Eucalyptus*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 410, p. 76-83, 2018.

ROCHA, J. H. T.; WENZEL, A. V. A.; MELO, E. A. S. C.; LIMA, A. S. F.; HAKAMADA, R. E.; FERRAZ, A. V.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; GONÇALVES, J. L. M.; MOREIRA, G.; GONÇALVES, A. N. Responses of coppiced *Eucalyptus* to macro- and micronutrient application. **New Forests**, Amsterdam, p. 1-15, 2018.

SOARES, A. A. V.; LEITE, H. G.; CRUZ, J. P.; FORRESTER, D. I. Development of stand structural heterogeneity and growth dominance in thinned *Eucalyptus* stands in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 384- p. 339-346, 2017.

SOUZA, D. P. L.; GALLAGHER, T.; MITCHELL, D.; MCDONALD, T.; SMIDT, M. Determining the effects of felling method and season of year on the regeneration of short rotation coppice. **International Journal of Engineering**, Amsterdam, v. 27, n. 1, p. 53-65, 2016.

SPINELLI, R.; PARI, L.; AMINTI, G.; MAGAGNOTTI, N.; GIOVANNELLI, A. Mortality, re-sprouting vigor and physiology of coppice stumps after mechanized cutting. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 74, n. 5, p. 1-12, 2017.

STANGERLIN, D. M.; SANTINI, E. J.; SUSIN, F.; MELO, R. R.; GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R. Uso de estufa solar para secagem de madeira serrada. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 462-472, 2009.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M. A.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J. M.; SILVA, G. G. C.; AZEVEDO, M. R. The Brazil *Eucalyptus* potential productivity project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1684–1694, 2010.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O manuscrito utilizou informações de 6 talhões comerciais de eucalipto que apresentavam idades distintas de talhadia, sendo definidas três classes de idade. Cada classe de idade conteve dois talhões. Indica-se para futuras pesquisas o uso de dados coletados periodicamente de parcelas permanentes, distribuídas em talhões de mesma idade, para melhor eficiência das análises estatísticas. Tais dados permitiriam, inclusive, a modelagem do crescimento e produção em nível de distribuição de diâmetros.

Uma limitação observada no desenvolvimento deste manuscrito foi a falta de informações volumétricas específicas para as margens de talhões, onde se mantiveram pilhas de madeira após o baldeio. Para tanto, explorou-se as análises de distribuição de diâmetros e quantificação da área basal. Esta abordagem permitiu a elaboração precisa de comparações entre regiões do talhão; interior e margens (onde se mantiveram pilhas de madeira após o baldeio).

Outra limitação foi a falta de informações das margens dos talhões onde não foram mantidas pilhas de madeira após o baldeio. Estas informações poderiam fornecer subsídios para a discussão dos resultados. Entretanto, não foi um empecilho para a concepção do manuscrito, pois o inventário florestal é rotineiramente realizado no interior dos talhões, negligenciando suas margens.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

A oportunidade de atuar na docência permitiu melhor direcionamento do conhecimento a ser adquirido durante o doutorado. O retorno à rotina acadêmica como discente foi um desafio de superação pessoal e profissional. A partir da concessão de afastamento para capacitação pelo IFMG foi possível um forte empenho nas atividades de pesquisa, demonstrando grande evolução nos conhecimentos científicos. Enfatiza-se que tais conhecimentos, ainda, estão em construção e que a constante atualização é necessária para o sucesso de todo profissional.

Os quatro anos de doutorado permitiu identificar que os modelos de aprendizado e conhecimento são modificados com o tempo e, por mais úteis e duradouros que possam parecer, darão lugar a outros mais adequados à realidade. O manejo florestal e a silvicultura devem estar em sintonia para maiores rendimentos operacionais e produtivos. A silvicultura de precisão é realidade e necessita ser melhor explorada por gestores florestais com o intuito de racionalizar o uso de insumos, como fertilizantes. A definição de padrões de práticas silviculturais deve ser vista com cautela, sobretudo, quando se adota sucessivas rotações no mesmo ciclo de cultivo.

A validação de metodologias de amostragem e análise de fatores que influenciam o crescimento de povoamentos florestais são essenciais para a assertividade em tomadas de decisões. O desenvolvimento desta tese, mesmo com inúmeras limitações, aqui identificadas ou não, foi um processo laborioso e gratificante. Foram realizadas previamente muitas simulações e testes estatísticos para que os resultados apresentados tenham sido os mais confiáveis possíveis. Tenho a expectativa de que em um futuro próximo, eu revise a tese e constate, ou não, novos erros, que até então, não fui capaz de detectar. Contudo, faço votos de que o seu conteúdo seja aproveitado para futuras pesquisas e contribua para o setor florestal.